



# **KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH**

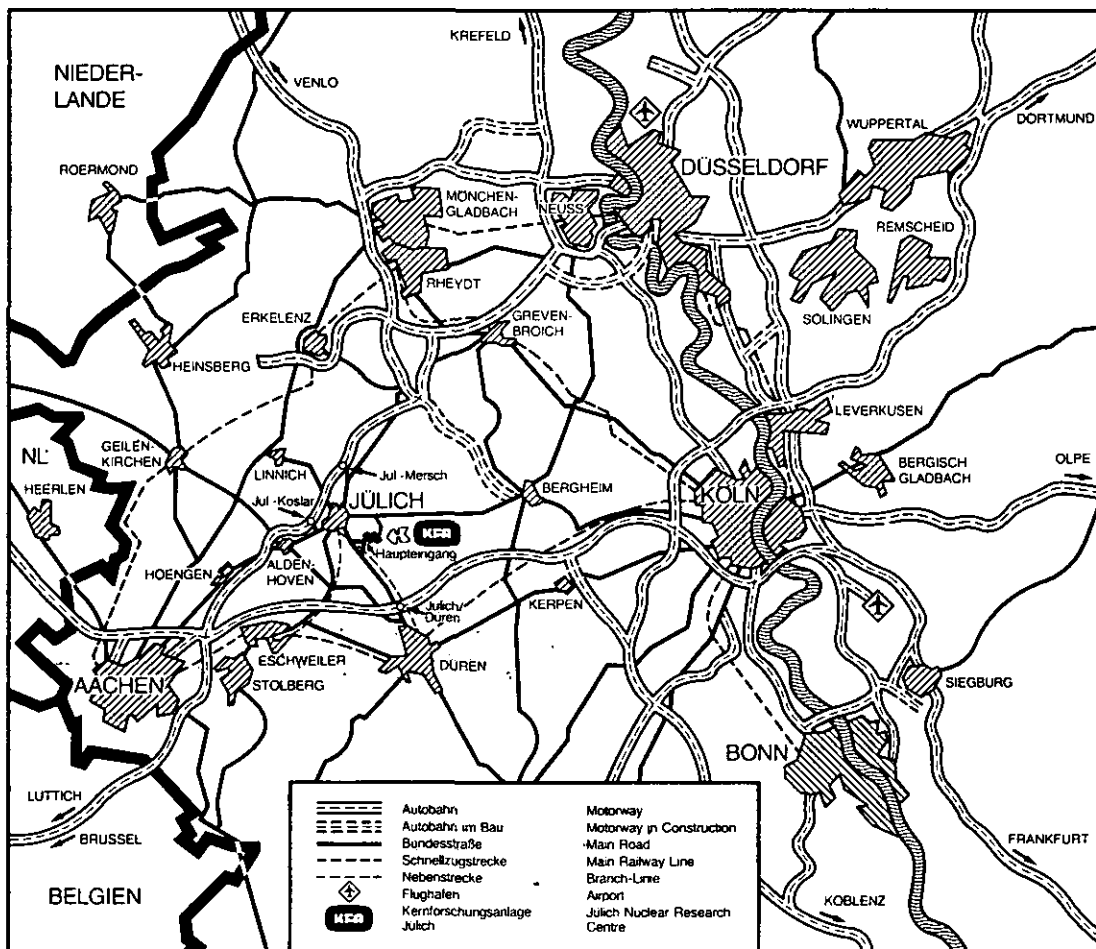
Institut für Reaktorwerkstoffe

**Erarbeitung von Grundlagen zu einem Regelwerk  
über die Auslegung von HTR-Komponenten  
für Anwendungstemperaturen oberhalb 800°C**

**Sonderforschungsvorhaben SR 191  
des Bundesminister des Innern**

**Abschlußbericht  
November 1979 bis Dezember 1983**

**Jül - Spez - 248  
März 1984  
ISSN 0343-7639**



Als Manuskript gedruckt

## Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 248

Institut für Reaktorwerkstoffe Jül – Spez – 248

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 024 61/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Erarbeitung von Grundlagen zu einem Regelwerk  
über die Auslegung von HTR-Komponenten  
für Anwendungstemperaturen oberhalb 800°C**

**Sonderforschungsvorhaben SR 191  
des Bundesminister des Innern**

**Abschlußbericht**

**November 1979 bis Dezember 1983**

Auftragnehmer:

GRS, Köln

KFA, Jülich

MPA, Stuttgart

RWTÜV, Essen

In Zusammenarbeit mit:

GHT/IA, Bensberg

HRB, Mannheim

Verfasser:

Fachkreis „Regelwerk“

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Fachkreises  
Regelwerk wieder und muß nicht mit der Meinung des auftraggebenden  
Bundesministerium des Innern übereinstimmen.

**ERARBEITUNG VON GRUNDLAGEN ZU EINEM REGEL-  
WERK ÜBER DIE AUSLEGUNG VON HTR-KOMPONENTEN  
FÜR ANWENDUNGSTEMPERATUREN OBERHALB 800 °C**

Sonderforschungsvorhaben SR 191  
des Bundesminister des Innern

von  
Fachkreis "Regelwerk"

Zusammenfassung

Bei der Nutzung des Hochtemperaturreaktors als Wärme erzeugungs-  
system für Prozeßwärme werden metallische wärmetauschende Kompo-  
nenten Arbeitstemperaturen oberhalb 800 °C ausgesetzt. Für  
diesen Anwendungstemperaturbereich fehlen im Sinne einer atom-  
rechtlichen Genehmigung Regeln für die Komponentenauslegung, die  
Aussagen über Werkstoffe, konstruktive Gestaltung und Festig-  
keitsnachweise enthalten. Als Rahmenvorgabe für Grundlagen zu  
solchen Regeln dient ein sicherheitstechnisches Konzept, das für  
die sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten, Röhrenspaltöfen  
und He/He-Wärmetauscher zur Anwendung kommen sollte.

Nach Prüfung der Aussagen vorhandener konventioneller und kern-  
technischer Regelwerke und Rahmenrichtlinien zeigt sich, daß die  
Auslegungsphilosophie des Niedertemperaturbereichs auf Komponen-  
ten mit Arbeitstemperaturen oberhalb 800 °C nicht übernommen  
werden kann. Der ASME-CC N 47 gibt Auslegungsregeln bis etwa  
800 °C an, die auf den höheren Temperaturbereich nicht  
extrapolierbar sind.

Bei der Erstellung der Grundlagen für ein Regelwerk wird auch  
auf die Erfahrungen bei der Abwicklung des Thorium-Hochtempera-  
turreaktors (THTR) zurückgegriffen.

Die Grundlagen für einzelne Arbeitsbereiche einer Regel für die  
Komponentenauslegung sind:

## Werkstoffe

Die benötigten Werkstoffdaten marktgängiger Werkstoffe für Konstruktion und Auslegung sind weitgehend vorhanden, die Absicherung des Langzeitverhaltens muß jedoch durch weitere Datenbelegungen fortgeführt werden. Für inelastische Analysen und zur Bewertung des Betriebsverhaltens sind erste Ansätze von Stoffgesetzen vorhanden.

## Schadensakkumulation

Eine Überprüfung der verschiedenen Schadensakkumulationsmethoden an Versuchsergebnissen aus dem HTR-Werkstoffprogramm zeigt, daß keine der untersuchten Methoden das Kriech-Ermüdungsverhalten genau genug beschreibt.

Die lineare Schadensakkumulationsregel mit eigens auf den Werkstoff und Temperaturbereich bezogenen zulässigen Grenzen sollte zunächst aus praktischen Gründen für die Bewertung der zulässigen Betriebsdauer herangezogen werden.

## Lastfallkategorie und Belastungen

Die Einteilung der Lastfälle und Beanspruchungsstufen für Komponenten erfolgt in Anlehnung an KTA 3201.2. Dabei wird den HTR-spezifischen Bedingungen Rechnung getragen. Für die Auslegung, Konstruktion und Berechnung sind alle mechanischen, thermischen und umgebungsbedingten Belastungen zu berücksichtigen.

## Versagensarten und Auslegungsgrenzen

In Anlehnung an den ASME-CC N 47 werden Auslegungsrichtlinien gegen die verschiedenen Versagensarten festgelegt. Es wird vorgeschlagen, Sicherheitsabstände entsprechend ASME-CC N 47 zu übernehmen, die erforderlichen Sicherheitsabstände gegen zeitabhängige/ zeitunabhängige Traglast jedoch neu festzulegen und experimentell abzusichern. Die Auslegung gegen Ermüdung erfolgt anhand von aus Ermüdungsversuchen abgeleiteten Auslegungskurven. Die Vorgehensweise zur Bewertung von Schweißnähten wird nach Vorliegen der Versuchsergebnisse an Schweißverbindungen kritisch zu überprüfen sein.

## Komponentenbeurteilung

Für die Beurteilung des Verhaltens von HTR-Komponenten wurden Gesichtspunkte der konstruktiven Gestaltung und Dimensionierung erörtert sowie Rechnungen zum Kriechratcheting, Kriechbeulen und Kriech-Ermüdungsverhalten durchgeführt.

Im Rahmen der betrieblichen Überwachung müssen wiederkehrende Prüfungen dem Werkstoffverhalten und den zur Zeit geringen Auslegungserfahrungen für Anwendung im angestrebten Temperaturbereich Rechnung tragen.

### Vorschriften für die Herstellung und Montage

Für die Vorschriften zur Herstellung von Komponenten wird die KTA-Regel 3201.3 für LWR für den Teil "austenitische Werkstoffe" übernommen, wobei HTR-spezifische Details gesondert eingearbeitet werden.

Auch wenn noch nicht alle Versuchsergebnisse und Berechnungsverfahren vorliegen, können mit dem erreichten Kenntnisstand und den vorgegebenen Vorgehensweisen die hochtemperaturbeaufschlagten Komponenten für eine im Hinblick auf eine Prototypanlage vertretbare Betriebszeit (z. B. 70 000 h) ausgelegt werden. Die Grundlagen für die Erstellung einer KTA-Regel sind gegeben.

## SONDERFORSCHUNGSVORHABEN SR 191:

### "Erarbeitung von Grundlagen zu einem Regelwerk über die Auslegung von HTR-Komponenten mit Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C"

#### Verantwortlicher:

Prof. Dr. H. Nickel                      Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA),  
Institut für Reaktorwerkstoffe (IRW)

#### Fachkreis "Regelwerk"

Dr. F. Schubert	KFA/IRW, Jülich (Sitzungsleiter)
Dr. K. Bieniusa	Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Köln (GRS)
Dr. H. Hahn	Rhein.-Westf. Techn. Überwachungsverein (RWTÜV), Essen
Dr. M. Dette	"
Dipl.-Ing. M. Hoffmann	Staatl. Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart (MPA)
Dr. W. Theymann	Hochtemperatur-Reaktorbau, Mannheim (HRB)
Dipl.-Ing. E. Bodmann	"
Dipl.-Ing. J. Pschowski	"
Dipl.-Ing. D. Grosser	INTERATOM (Internationale Atomreaktorbau) GmbH, Bensberg
Dr. H. Breitling	"
Dipl.-Ing. H.J. Seehafer	"
Dr. G. Scheidler	KFA/HTA EG-Stab (Gast)
Dr. H. Schuster	KFA/IRW
Dr. H.J. Penkalla	KFA/IRW (Protokollführer)
Dr. H.H. Over	KFA/IRW

#### Arbeitsgruppe "Regelwerk"

Dr. H.H. Over	KFA/IRW
Dr. H.J. Penkalla	"
Herr F. Sieweke	"
Frl. M. Linden	"

## INHALTSVERZEICHNIS:

	<u>Seite:</u>
1. Vorwort	1
2. Randbedingungen für die Arbeiten des Fachkreises Regelwerk	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Struktur eines Komponenten-Regelwerkes	6
2.2.1 Allgemeine Zielsetzung	6
2.2.2 Die Versagensarten im Hochtemperatur- bereich	7
2.2.3 Komponentenauslegung	9
2.2.4 Qualitätssicherung	10
2.3 Anlagenplanung und Regelerarbeitung	10
2.3.1 Der Röhrenspaltofen	11
2.3.2 Der Helium/Helium-Wärmetauscher	12
Fazit	17
Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 2	18
3. Werkstoffverhalten bei hohen Tempera- turen	19
3.1 Belastungsarten	19
3.2 Kriechen	21
3.2.1 Beschreibung des Phänomens	21
3.2.2 Experimentelle Ermittlung des Kriech- verhaltens	23
3.2.3 Bestimmung der Zeitstandkennwerte	23
3.2.4 Extrapolation von Zeitstandkennwerten, Mittel- und Mindestwerte	25
3.2.5 Stoffgesetze	26
3.2.6 Kriechen unter wechselnder Belastung	28



	<u>Seite:</u>
3.3	Ermüdung 30
3.3.1	Beschreibung des Phänomens 30
3.3.2	Experimentelle Ermittlung des Ermüdungs- verhaltens 31
3.3.3	Bestimmung der Lebensdauer 31
3.3.4	Besonderheiten bei hohen Temperaturen 33
3.3.5	Mathematische Beschreibung 36
3.3.5	Ermüdung bei zyklischen Beanspruchungen mit wechselnden Dehnschwingbreiten 38
3.4	Kurzzeiteigenschaften (einachsiger Zug- versuch) 39
3.4.1	Beschreibung des Phänomens 39
3.4.2	Experimentelle Ermittlung der Kurzzeit- eigenschaften 39
3.4.3	Bestimmung der Kurzzeitkennwerte 40
3.4.4	Besonderheiten bei hohen Temperaturen 41
3.5	Strukturstabilität und Umgebungsein- fluß 44
3.5.1	Gefügeänderungen und deren Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften 44
3.5.2	Umgebungseinflüsse 46
	<b>Fazit 49</b>
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 3 50
4.	Übertragbarkeit vorhandener Regeln 56
4.1	Besonderheiten im Hochtemperaturbereich 56
4.2	Regeln für Werkstoffe und Erzeugnisformen 56
4.3	Regeln für die Festigkeitsauslegung 58
4.4	Regeln für Fertigung und Montage 60
4.5	Regeln für wiederkehrende Prüfungen 60
	<b>Fazit 62</b>
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 4 63

	<u>Seite:</u>
5.	THTR-300-Erfahrungen 64
5.1	Der Dampferzeuger als repräsentative Komponente. 64
5.2	Werkstoffe und Erzeugnisformen 65
5.3	Festigkeitsauslegung und Lebensdauerbeurteilung 66
5.3.1	Dimensionierung der drucktragenden Bauteile 67
5.3.2	Begrenzung von Primär- und Sekundärspannungen 68
5.3.3	Kriech- und Ermüdungsanalyse 68
5.4	Schlußfolgerungen für die Arbeiten des Fachkreises "Regelwerk" 69
	<b>Fazit</b> 71
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 5 72
6.	Sicherheitstechnisches Konzept als Rahmenvorgabe 73
6.1	Sicherheitsprinzipien 73
6.3	Erreichung der Schutzziele 74
	<b>Fazit</b> 79
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 6 80
7.	Werkstoffe 82
7.1	HTR-Strukturwerkstoffe 82
7.2	Kennwerte physikalischer und mechanischer Eigenschaften 83
7.3	Stoffgesetze zum Werkstoffverhalten 86
7.4	Werkstoffbegutachtung 88
7.5	Vorschriften für die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen 89
	<b>Fazit</b> 91
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 7 92

	<u>Seite:</u>
8. Schadensakkumulation	96
<b>Fazit</b>	<b>99</b>
Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 8	100
9. Lastfallkategorie und Belastungen	105
9.1 Lastfallkategorien	105
9.2 Betriebsstufen	106
9.2.1 Stufe A	106
9.2.2 Stufe B	106
9.2.3 Stufe C	106
9.2.4 Stufe D	107
9.3 Belastungen	107
9.3.1 Mechanische Belastungen	107
9.3.2 Thermische Belastungen und thermisch induzierte Beanspruchungen	107
9.3.3 Umgebungsbedingte Belastungen	109
<b>Fazit</b>	<b>111</b>
Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 9	112
10. Versagensarten und Auslegungsgrenzen	113
10.1 Versagensarten	113
10.2 Versagensbezogene Grenzwerte	114
10.3 Grenz- bzw. Vergleichswerte	115
10.3.1 Absicherung gegen Gewalt- und Kriech- bruch	115
10.3.2 Absicherung gegen Ratcheting/ Kriech- ratcheting	117
10.3.3 Absicherung gegen Ermüdung/Kriecher- müdung	118
10.3.4 Absicherung gegen Beulen, Kriechbeulen	121
10.3.5 Absicherung gegen Übermäßige Verformung	123
<b>Fazit</b>	<b>124</b>
Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 10	125

	<u>Seite:</u>
11.	Komponentenbeurteilung 126
11.1	Gesichtspunkte für die konstruktive Gestaltung 126
11.2	Erfordernisse für die festigkeitsmäßige Beurteilung 127
11.3	Dimensionierung drucktragender Bauteile 128
11.3.1	Begriff 128
11.3.2	Dimensionierungs-Last 129
11.3.3	Dimensionierungs-Temperatur 130
11.3.4	Dimensionierungs-Zeit 130
11.3.5	Besonderheiten bei der Bestimmung der Dimensionierungs-Vorgaben 130
11.4	Berechnung 131
11.4.1	Kriechratcheting 131
11.4.2	Kriechbeulen 132
11.4.3	Kriech-Ermüdungs-Analysen 133
11.4.4	Anwendung vereinfachter Methoden 135
11.5	Bruchmechanische Absicherung 137
11.6	Betriebliche Überwachung und wiederkehrende Prüfungen 138
11.6.1	Allgemeine Anforderungen zur Qualitätssicherung 138
11.6.2	Stand der wiederkehrenden Prüfungen bei Leichtwasserreaktoren 139
11.6.3	Anforderungen an die HTR-Komponenten zur Gewährleistung der Wiederholungsprüfbarkeit 140
	<b>Fazit 142</b>
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 11 143

Seite:

12.	Vorschriften für die Fertigung und Montage von Komponenten	151
	<b>Fazit</b>	<b>153</b>
	Dokumentationen/Literatur zu Kapitel 12	154
13.	Ausblick	
A 1	Anhang A: Werkstoffdatenblätter	
A 2 1-5	Anhang B: Liste der Dokumentationen	

## 1. Vorwort

Das Forschungsvorhaben BMI SR 191 "Erarbeitung der Grundlagen zu einem Regelwerk über die Auslegung von HTR-Komponenten mit Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C" wurde durch den Bundesminister des Innern gefördert und durch Eigenbeteiligung der mitarbeitenden Institutionen ergänzt. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, in Zukunft ein entsprechendes KTA-Regelwerk für Hochtemperaturbeaufschlagte HTR-Komponenten zu initiieren und zeitsparend zu erstellen. Dieses Regelwerk stellt dann in einem zukünftigen Genehmigungsverfahren einer HTR-Anlage zur Erzeugung von nuklearer Prozeßwärme die Grundlage für die Werkstoffe, die Konstruktion, die Auslegung von HTR-Komponenten und die Beurteilung des Betriebsverhaltens dar.

Die Erfahrungen beim Bau fortgeschrittener Reaktoren haben gezeigt, daß das Fehlen zutreffender Regelwerke zu nicht abschätzbaren Kostensteigerungen und Zeitverzögerungen geführt hat. Um für künftige HTR-Anlagen zur Erzeugung von Prozeßwärme in einem Genehmigungsverfahren günstigere Voraussetzungen zu schaffen, ist durch die Kernforschungsanlage Jülich dieses Vorhaben initiiert und der Fachkreis "Regelwerk" gegründet worden.

Das Ziel der Erarbeitung der genannten Grundlagen für ein Regelwerk ließ sich nur dadurch erreichen, daß sowohl Ministerien des Bundes und des Landes Nordrhein-Westfalens als auch wissenschaftliche Institutionen, Gutachterorganisationen und vor allem die an der HTR-Entwicklung beteiligten Industriepartner in vorbildlicher Weise zusammenarbeiteten.

Insbesondere sind dabei zu nennen:

- der Bundesminister des Innern (BMI), durch dessen finanzielle Förderung und Zusage der Unterstützung im Kerntechnischen Ausschuß (KTA) die Basis für dieses Vorhaben geschaffen wurde

- das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), das sich neben der langjährigen Förderung der HTR-Entwicklung mit zusätzlichen Sondermitteln für Untersuchungen zum Bauteilverhalten beteiligt, die sich an der Problematik der Regelwerkarbeit orientieren
- das Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr (MWMV) des Landes Nordrhein-Westfalen, durch dessen langjährige Förderung des Materialprogramms bei den Industriepartnern eine breite Datengrundlage geschaffen wurde
- die Systemhersteller Internationale Atomreaktorbau GmbH (INTERATOM) und HochtemperaturReaktorbau GmbH (HRB), die durch eine sehr konstruktive Zusammenarbeit einen wesentlichen Beitrag lieferten
- die am Sonderforschungsvorhaben Beteiligten, die Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), die Staatliche Materialprüfungsanstalt Stuttgart (MPA) und der Rheinisch-Westfälische Technische Überwachungsverein e.V. (RWTÜV), die wichtige Themenbereiche bearbeiteten und dabei ihre Kenntnisse aus Genehmigungsverfahren an den fortschrittlichen Reaktorsystemen THTR-300 und SNR-300 einbrachten. Dabei wurden auch die Erfahrungen aus der Werkstoffentwicklung für die LWR-Technologie genutzt
- die Projekt-Partner der Entwicklungsgemeinschaft-Hochtemperaturreaktor (EG-HTR): Brown, Boveri & Co AG (BBC) und das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung (EIR) sowie Bergbau-Forschung GmbH (BF), Rheinische Braunkohlenwerke AG (RBW), Mannesmann-Forschungsinstitut GmbH (MFI) und Thyssen-Edelstahlwerke AG (TEW), die ihre umfangreichen Versuchsergebnisse als Beitrag leisteten

- der Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), der beratend bei Werkstofffragen, insbesondere Vorschriften für die Werkstoffbegutachtung, mitwirkte
- die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, die Versuchsergebnisse aus Werkstoffuntersuchungen zur Verfügung stellten

Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang auf den Vorteil, daß an diesem Vorhaben Auslegungs-, Festigkeitsberechnungs- und Werkstoff-Fachleute nicht nur aus Industrie und Forschung mitwirkten, sondern auch von an den Genehmigungsverfahren mitarbeitenden Institutionen.

Als Grundlagen für ein Regelwerk waren das prinzipielle Verständnis und die Bewertung der Reaktionen auf Belastungen von bei Temperaturen oberhalb 800 °C in einer nuklearen Anlage zeitstandbeanspruchten Komponenten und das Wesen der thermisch induzierten Dehnungen und Spannungen anzusehen. Für dieses Verständnis mußten die Kenntnis des Werkstoffverhaltens zugrunde gelegt und für die Auslegung Datensätze, mathematische Formulierungen und Sicherheitsabstände vorgeschlagen werden. Die notwendigen Forschungsarbeiten einschließlich der Untersuchungen zum Werkstoffverhalten und zur Werkstoffmechanik wurden im Rahmen der F. u. E. Arbeiten der GCHTR durchgeführt oder sind durch die im Verlauf der Arbeiten gewonnenen Erkenntnissen initiiert worden.

Bei den Arbeiten wurden auch die Empfehlungen des Beratungsgremiums PNP/HHT-Sicherheit (1980) bezüglich Werkstoffe und Festigkeitsauslegung bearbeitet und im Kontext der einzelnen Arbeitspakete behandelt.

In diesem Bericht wird der erarbeitete Kenntnisstand des Fachkreises "Regelwerk" dargestellt. Aus förderungspolitischen Gründen konnten alle im Antrag angesprochenen Themenkreise nur im Zeitraum 1979 bis 1982 bearbeitet werden, in 1983 mußten dagegen die Arbeiten auf wenige Schwerpunkte beschränkt bleiben.



Der Bericht hält sich an die im Antrag zum Forschungsvorhaben genannten Arbeitspakete

- Werkstoffe
- Aussagen verschiedener Regelwerke
- sicherheitstechnisches Konzept
- Belastungen und Konstruktion
- Berechnungen.

Zur Einführung sind eine Beschreibung der Ausgangssituation (Kap. 2) und eine grundsätzliche Darlegung der Besonderheiten des Werkstoffverhaltens bei hohen Temperaturen (Kap. 3) vorangestellt.

Die in diesem Abschlußbericht zusammenfassenden Stellungnahmen basieren auf zweiundvierzig Dokumentationen, die zum Teil bis zum Regelvorschlag ausgereift sind. Die zugeordneten Hintergrundinformationen sind am Ende der einzelnen Kapitel aufgelistet. Dem BMI liegen die Dokumentationen bis 1982 als Teil B1 bis B7 des Zwischenberichtes mit Stand 1982 vor. In der vorliegenden Form sind diese Dokumentationen nicht für eine Veröffentlichung vorgesehen, können aber den Fachleuten der entsprechenden KTA-Gremien zugänglich gemacht werden.

Die Arbeiten des Fachkreises "Regelwerk" haben zu einer Reihe regelfähiger Aussagen geführt. Dennoch verbleiben in einigen wichtigen Bereichen, z. B. Sicherheitsfaktoren, Stoffgesetze und vereinfachte Methoden, offene Fragen, die einer wichtigen experimentellen Bearbeitung und theoretischen Vertiefung bedürfen. Ein Teil der experimentellen Untersuchungen wird von der EG-HTR im Rahmen ihrer Entwicklungsarbeiten aufgegriffen. Diese Arbeiten sind noch nicht beendet. In diesem Bericht wird dennoch versucht, eine pragmatische und sicherheitstechnisch vertretbare Lösung vorzuschlagen.

Der Bericht enthält die Meinungen und Erfahrungen des Fachkreises "Regelwerk", wobei in allen wesentlichen Punkten Übereinstimmung vorliegt.

## 2. Randbedingungen für die Arbeiten des Fachkreises Regelwerk

### 2.1 Einleitung

In ~~über zehn Jahren technischer Entwicklung~~ ist heute im Bereich der Hochtemperaturreaktor-Technologie ein Qualitätsstandard erreicht, auf dessen Basis ein ~~sicherer Betrieb~~ einer Reaktoranlage unter Hochtemperaturbedingungen bis ca. 750 °C Betriebstemperatur für eine Einsatzzeit von ~~über 100 000 Stunden~~ sichergestellt werden kann. Mit dem Bau des THTR wurden die Forschungs-, Entwicklungs- und Planungsarbeiten mit der Zielsetzung der Errichtung einer HTR-Anlage zur Stromerzeugung erfolgreich abgeschlossen.

Das erreichte Ziel bedeutet nicht nur den Abschluß dieser Entwicklung, sondern gleichzeitig den Neubeginn einer zweiten Phase, die, aufbauend auf dem erreichten Kenntnisstand, an der Entwicklung einer Prototypanlage zur Erzeugung nuklearer Prozeßwärme (PNP) orientiert ist. Die hiermit verbundene Randbedingung einer Systemtemperatur von ca. 950 °C führt zu neuen technologischen Vorgehensweisen für viele Bereiche des Planungs- und Fertigungsprozesses einer entsprechenden Anlage. In das besondere Blickfeld rücken dabei die für die Wärmeübertragung konzipierten wärmetauschenden Komponenten Röhrenspaltöfen (RSO) und Helium/Helium-Wärmetauscher (He/He-WT). Diese werden mit der entsprechenden Systemtemperatur beaufschlagt und bilden mit einigen Bauteilen den Primärkreisabschluß der Anlage. Das gesteckte Ziel dieser Komponentenentwicklung mit den genannten Randbedingungen wird durch Synthese von

- komponentenspezifischer Werkstoffentwicklung und -charakterisierung
- konstruktiver Komponentengestaltung
- Entwicklung von Methoden der Komponenten-Auslegung
- planungsbegleitender Fertigungsentwicklung (z. B. Schweißprogramme)

angesteuert.

Die Aufgabe des Fachkreises "Regelwerk" bestand darin, die Grundlagen eines Regelwerkes für die Auslegung von HTR-Komponenten für Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C zu erarbeiten. Dabei stand der Aspekt der Komponentensicherheit im Vordergrund. Gesichtspunkte der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit wurden angemessen berücksichtigt.

Abgestützt auf den Ergebnissen parallel durchgeführter Werkstoffprogramme und orientiert an Komponenten einer Prozeßwärmanlage lag der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens "Regelwerk für Einsatztemperaturen oberhalb 800 °C" auf dem Gebiet der Komponentenauslegung.

Im Verständnis des Fachkreises "Regelwerk" beinhaltet der Begriff Komponentenauslegung die Bearbeitung der Werkstofffragen und der konstruktiven Gestaltung einschließlich der Festigkeitsnachweise.

## 2.2 Struktur eines Komponenten-Regelwerkes

### 2.2.1 Allgemeine Zielsetzung

Ein Komponenten-Regelwerk im kerntechnischen Bereich fixiert die Maßnahmen, die für die langzeitige Funktion der Komponente im Reaktor während der Betriebseinsatzzeit notwendig sind. Die Formulierung dieser Maßnahmen für HTR-Komponenten mit ihren hohen Einsatztemperaturen setzt somit die Kenntnis aller möglichen Versagensformen voraus.

Dem Versagen der Komponente wird durch ein Spektrum von Maßnahmen begegnet, das sich in zwei Ebenen gliedern läßt:

- die Komponentenauslegung
- die Qualitätssicherung.

In der Komponentenauslegung sind die qualitätserzeugenden Maßnahmen zusammengefaßt; die Qualitätssicherung hat die Aufgabe, die Gültigkeit der Voraussetzungen für die Auslegung (Materialeigenschaften, Fehlerbegrenzung, Toleranzeinhaltung,

Belastungsdaten) während Herstellung und Einsatz der Komponente sicherzustellen.

Tafel 1 stellt den Zusammenhang zwischen der Zielsetzung der langzeitigen Funktionserfüllung und den Maßnahmen auf der Ebene der Komponentenauslegung und der Qualitätssicherung schematisch dar.

### 2.2.2 Die Versagensarten im Hochtemperaturbereich

Im Bereich niedriger Temperaturen (etwa bis 400 °C) sind die Versagensformen bekannt. Zu diesen Versagensformen des Nieder-temperaturbereiches, die prinzipiell auch im Hochtemperaturbereich zu berücksichtigen sind, treten oberhalb etwa 400 °C und in verstärktem Maße oberhalb 700 °C Versagensformen, die durch das Kriechen und die Zeitabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften bestimmt sind.

#### Niedertemperaturbereich:

Gewaltbruch  
Ermüdung  
Ratcheting  
Beulen  
Übermäßige Verformung  
spontanes Versagen durch  
Materialfehler

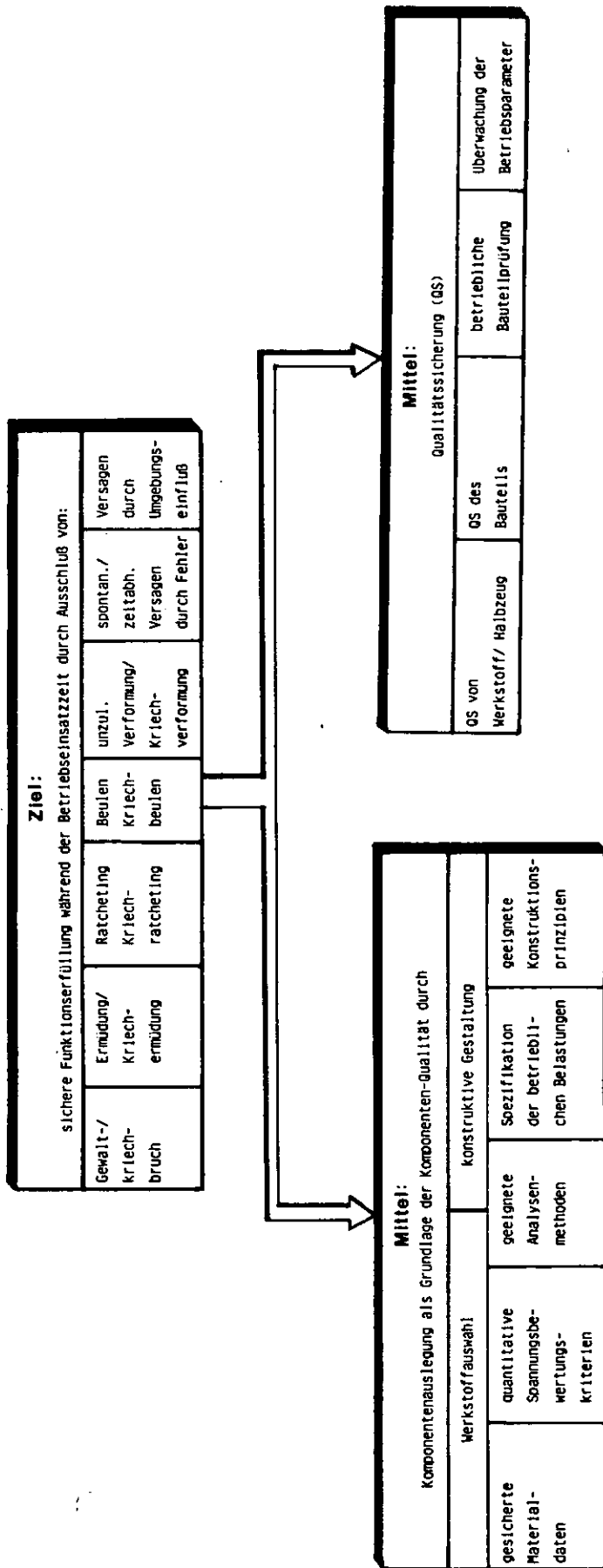
#### Hochtemperaturbereich:

Kriechbruch  
Kriech-Ermüdung  
Kriech-Ratcheting  
Kriech-Beulen  
Kriech-Verformung  
zeitabhängiges Versagen durch  
Materialfehler

Umgebungsbedingtes Versagen kann in allen Temperaturbereichen auftreten.

Die Versagensformen des Hochtemperaturbereiches sind zwar qualitativ bekannt, die quantitativen Gesetzmäßigkeiten sind jedoch bei einem Teil dieser Mechanismen noch Gegenstand der Forschung.

Der Fachkreis hatte sich daher zunächst intensiv mit diesen Versagensformen zu befassen, bevor die hieraus sich ergebenden Konsequenzen für die Komponentenauslegung behandelt werden konnten.



Tafel 1: Qualifikation von HTR-Komponenten

Schwerpunkte dieser Arbeiten waren die Versagensarten

- Kriechen
- Kriech-Ermüdung
- Kriech-Ratcheting
- Kriech-Beulen.

Ein Zähigkeitskonzept, das im Einsatztemperaturbereich von LWR für Ferrite als Absicherung gegen Sprödbbruch angewendet wird, kann nicht auf im Hochtemperaturbereich zeitstandbeanspruchte Austenite und Nickelbasislegierungen übertragen werden.

### 2.2.3 Komponentenauslegung

Unter der Komponentenauslegung werden hier die beiden Vorgänge

- Werkstoffauswahl und
- konstruktive Gestaltung

verstanden. Sie bestimmen die Eignung der Komponente für den Einsatz im Reaktor. Eine qualifizierte Komponentenauslegung ist dann möglich, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Materialdaten sind gesichert und im Umfang geeignet, die verschiedenen Versagensformen analytisch zu behandeln und zu bewerten.
- Spannungsbewertungskriterien und Sicherheitsfaktoren sind quantitativ definiert.
- Methoden der Analyse (Spannungs-, Dehnungs-, Ermüdungs-, Lebensdaueranalyse, usw.) sind geeignet und gesichert.
- Die maßgeblichen Belastungen und Belastungssequenzen sind spezifiziert.
- Geeignete Konstruktionsprinzipien sind vorhanden.

Diese fünf Punkte sind zum Gegenstand eines zukünftigen HTR-Regelwerkes unter dem Gesichtspunkt "Komponentenauslegung" zu machen.

#### 2.2.4 Qualitätssicherung

Unter Qualitätssicherung sollen die Maßnahmen verstanden werden, die erforderlich sind, um die Gültigkeit der Voraussetzungen für die Komponentenauslegung festzustellen. Sie beinhalten somit

- Prüfungen zur Sicherstellung der Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe/Halbzeuge
- Prüfung auf Fehler an Halbzeugen und Bauteilen
- Prüfung auf Einhaltung von Abmessungen
- in bestimmten Fällen wiederkehrende Prüfungen am Bauteil
- Überwachung maßgeblicher Betriebsparameter (z. B. Temperaturen, Drücke, Betriebsmedien).

#### 2.3 Anlagenplanung und Regelerarbeitung

Diskussionen im Fachkreis haben gezeigt, daß die Fragen des mechanischen Verhaltens von Bauteilen unter den vorgegebenen thermischen Bedingungen so vielfältig sind, daß eine allgemeine Behandlung, losgelöst von speziellen Reaktorkomponenten und Reaktorprojekten, im vorgegebenen Rahmen unmöglich erschien. Die Arbeit des Fachkreises beschränkte sich daher nur auf die Fragestellungen, die an konkreten, in der Projektplanung für die Nutzung nuklearer Prozeßwärme bearbeiteten Komponenten auftauchten.

In den folgenden Ausführungen werden die betrachteten Komponenten und die speziellen Fragestellungen näher erläutert.

Zu den im Rahmen der Arbeiten des Fachkreises Regelwerk besonders betrachteten Komponenten einer PNP-Anlage gehören der Röhrenspaltofen und der Helium/Helium-Wärmetauscher.

Der Röhrenspaltofen (RSO) nutzt die Wärme des Primärheliums nach Austritt aus dem Reaktor-Core zur Methanreformierung. Einige Bereiche des Röhrenspaltofens erreichen Betriebstemperaturen bis zu 950 °C. Die primärkreisabschließenden Bauteile erreichen maximale Temperaturen von 900 °C.

Der Helium/Helium-Wärmetauscher (He/He-WT) dient der Auskopplung der Wärme des Primärkühlmittels, die dann über den Sekundärkreislauf anderen Prozessen wie z. B. der Kohlevergasung im Fließbett zugeführt wird. Für den He/He-WT werden derzeit zwei konstruktive Varianten verfolgt, die U-Rohr- und die Wendelrohrbauweise. Beide Konzepte weisen bezüglich Auslegung, Fertigung und wiederkehrender Prüfung Vor- und Nachteile auf. Im He/He-WT liegen die höchsten Bauteiltemperaturen bei 950 °C.

Beiden hier vorgestellten Komponenten ist gemeinsam, daß sie einen Primärkreisabschluß darstellen und folglich von sicherheitstechnischer Bedeutung sind. Maßgebend für die Komponentenbeurteilung sind die auf die jeweilige Belastungssituation bezogenen Versagensmöglichkeiten, die somit das Kriterium für die Auslegung darstellen.

### 2.3.1 Der Röhrenspaltofen

In der Prinzipskizze der Abb. 2.1 sind die wesentlichen Konstruktionsmerkmale des RSO wiedergegeben.

Die Spaltrohre (3) stellen den Primärkreisabschluß dar. Aufgrund der unterschiedlichen innen- und außenseitigen Drücke und Temperaturen bilden sich Primär- und Sekundärspannungen in der Wand der Spaltrohre aus. Zwar ist das Primärspannungsniveau niedrig, jedoch sind wegen der relativ hohen Temperatur die Spaltrohre gegen Kriech-Ratcheting und gegen Kriech-Ermüdung auszulegen. Die Hüllrohre (6) dienen der Einzelanströmung der Spaltrohre, um gegenüber einer bündelweisen Anströmung eine mögliche Verbiegung der Spaltrohre aufgrund von Unsymmetrien in der Temperaturverteilung zu vermeiden. Die Hüllrohre sind kein Primärkreisabschluß.



Der Anschluß Hüllrohr/Spaltrohr (4) in Form einer glatten Kreisringplatte stellt eine geometrische Störstelle dar und erfordert besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich der dort vorliegenden Temperaturdifferenz. Erleichternd für die Kriech-Ermüdungs-Bewertung kann die Tatsache gewertet werden, daß die dort zu erwartende Temperatur unterhalb 800 °C liegt.

Der Kompensator (5) weist in der Beanspruchung ebenfalls Merkmale auf, die eine Überprüfung auf mögliche Kriech-Ermüdung erfordern. Er stellt keinen Primärkreisabschluß dar und wirkt mit seiner Federrate über den Hüllrohranschluß als axiale Druckkraft auf das Hüllrohr, so daß dort der Nachweis gegen Knicken und Kriechbeulen zu erbringen ist.

Die Zwischenplatte (2) kann örtlich bis zu 800 °C aufweisen. Die hier vorliegenden Sekundärspannungen werden ebenfalls im Hinblick Kriech-Ermüdung beurteilt.

### 2.3.2 Der Helium/Helium-Wärmetauscher

Die wesentlichen konstruktiven Merkmale beider He/He-Wärmetauscher-Bauweisen sind in den Prinzipskizzen 2.2 und 2.3 wiedergegeben.

#### Helix-Bauweise

Die Wendelrohre (4) weisen mit bis zu 950 °C die höchste Bauteiltemperatur auf. Über die Wechselwirkung mit den Tragplatten kann es aufgrund von Temperaturdifferenzen über das Wärmetauscherbündel zu örtlichen Zwängungen kommen. Somit ist gegen Kriech-Ermüdung und gegen Kriech-Ratcheting auszulegen. Die Wärmetauscher-Rohre stellen einen Primärkreisabschluß dar und sind für einen möglichen sekundärseitigen Druckentlastungsstörfall für eine begrenzte Zeit gegen Kriechbeulen abzusichern.

Der heiße Sammler (10), ebenfalls Primärkreisabschluß, ist ein dickwandiges, zylindrisches Bauteil, das aufgrund radialer Temperaturdifferenzen mit überlagerten axialen Temperaturunterschieden vor allem im Umgebungsbereich zum Rohranschluß sowie zum Heißgasrückführrohr gegen Kriech-Ermüdung auszulegen ist.

Wie für die Wärmetauscherrohre gilt auch für den heißen Sammler als Primärkreisabschluß, daß er für begrenzte Zeit gegen eine Außendruckbelastung unter Störfallbedingungen ausgelegt sein muß.

Als Schutzfunktion für den Einströmbereich der Wärmetauscherrohre in den heißen Sammler im Hinblick auf heiße Temperaturstrahlen und unerwünschte Temperaturtransienten ist die heiße kegelige Rohrplatte (13) mit der thermal-sleeve Verbindung zum Heißgasrückführrohr gedacht. Gewichtsabtragung sowie radiale und axiale Temperaturdifferenzen stellen die maßgeblichen Belastungen dar und erfordern einen Nachweis gegen Kriech-Ratcheting und Kriech-Ermüdung.

Das Heißgasrückführrohr (3) schließt an den heißen Sammler an und stellt wiederum einen Primärkreisabschluß dar. Radiale und axiale Temperaturdifferenzen treten als Belastungen in den Vordergrund und erfordern eine Auslegung gegen Kriech-Ermüdung. Äußerer Überdruck als Folge eines möglichen sekundärseitigen Druckentlastungsstörfalls erfordern zusätzlich einen Nachweis gegen Kriech-Beulen.

#### U-Rohr-Kompaktbauweise

Vorteilhaft gegenüber dem Wendelrohrkonzept weist die U-Rohr-Kompaktbauweise keine vergleichbaren Interaktionen der Wärmetauscherrohre (6) mit den Tragplatten auf. Aufgrund von Temperaturunterschieden kann es jedoch zu Axialkräften kommen, so daß gegen Ausknicken auszulegen ist. Die geometrischen Störstellenbereiche wie z. B. Heißer Sammler (5) und heiße Rohrplatte (13) sind analog zur Helixausführung zu beurteilen. Die Rohrhalterungen des Wärmetauscherbündels sind einer Wechselbeanspruchung ausgesetzt und müssen gegen Kriech-Ermüdung ausgelegt werden.

Der innere Bündelmantel (9) wird im heißen Bereich durch Axialkräfte belastet und ist somit gegen Kriechbeulen abzusichern.

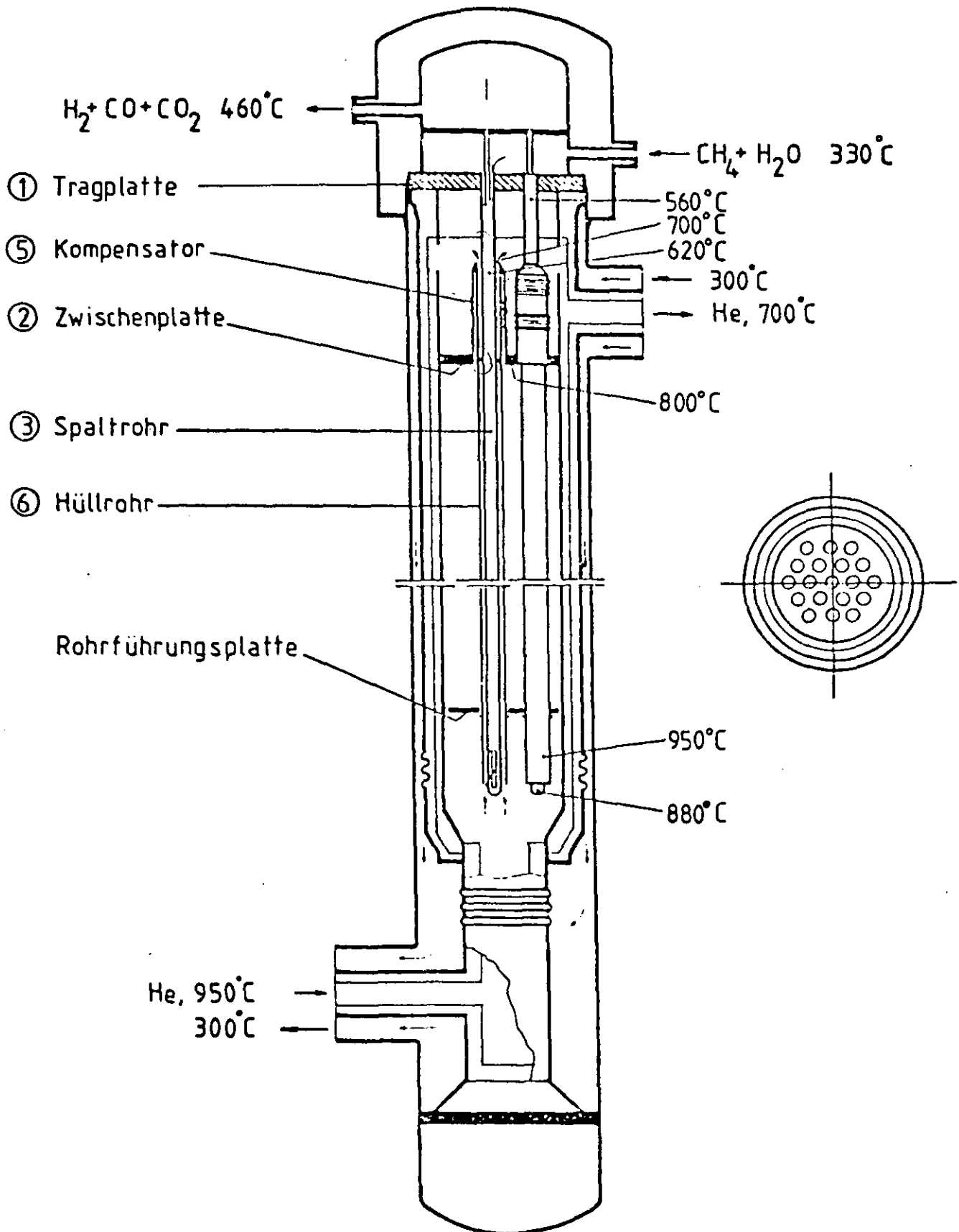


Abb. 2.1: Konstruktiver Aufbau des Röhrenspaltofens mit Hüllrohr-gasführung

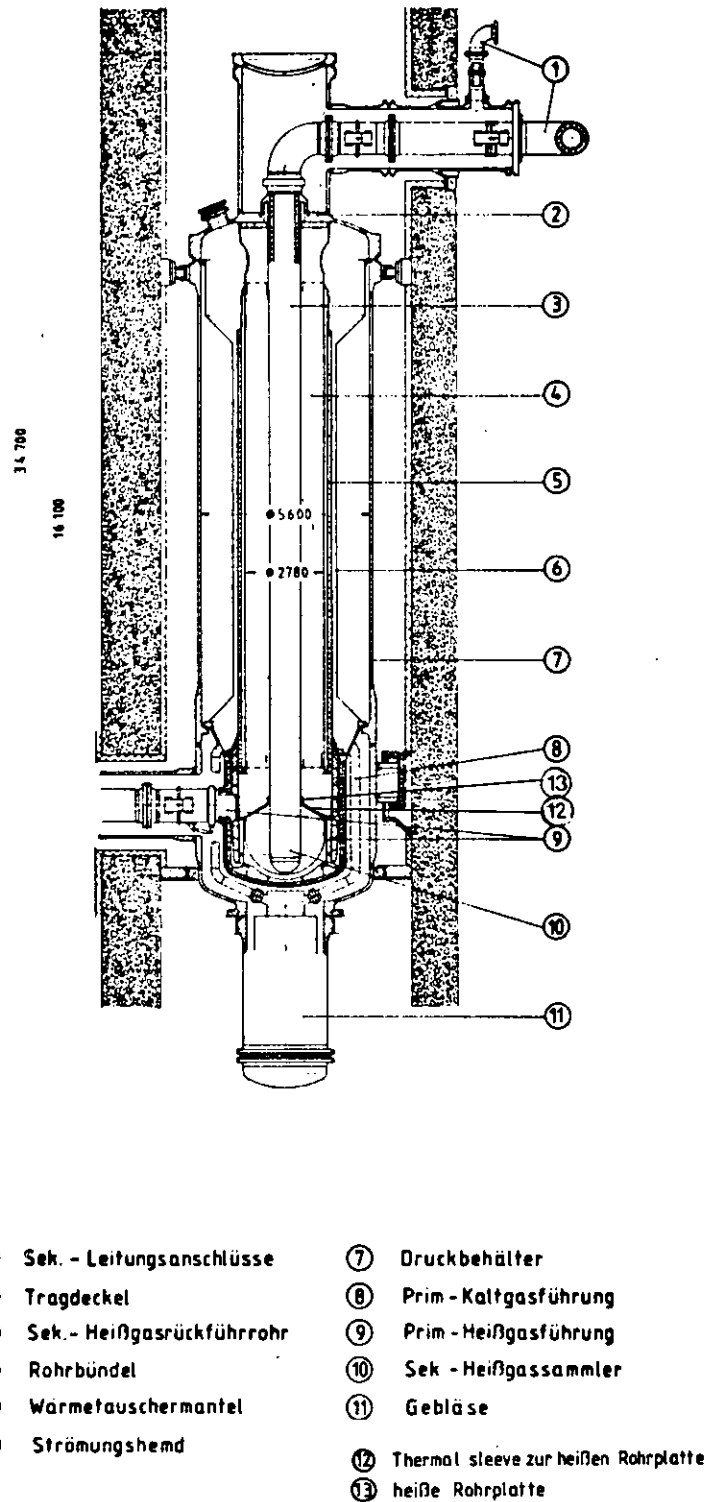
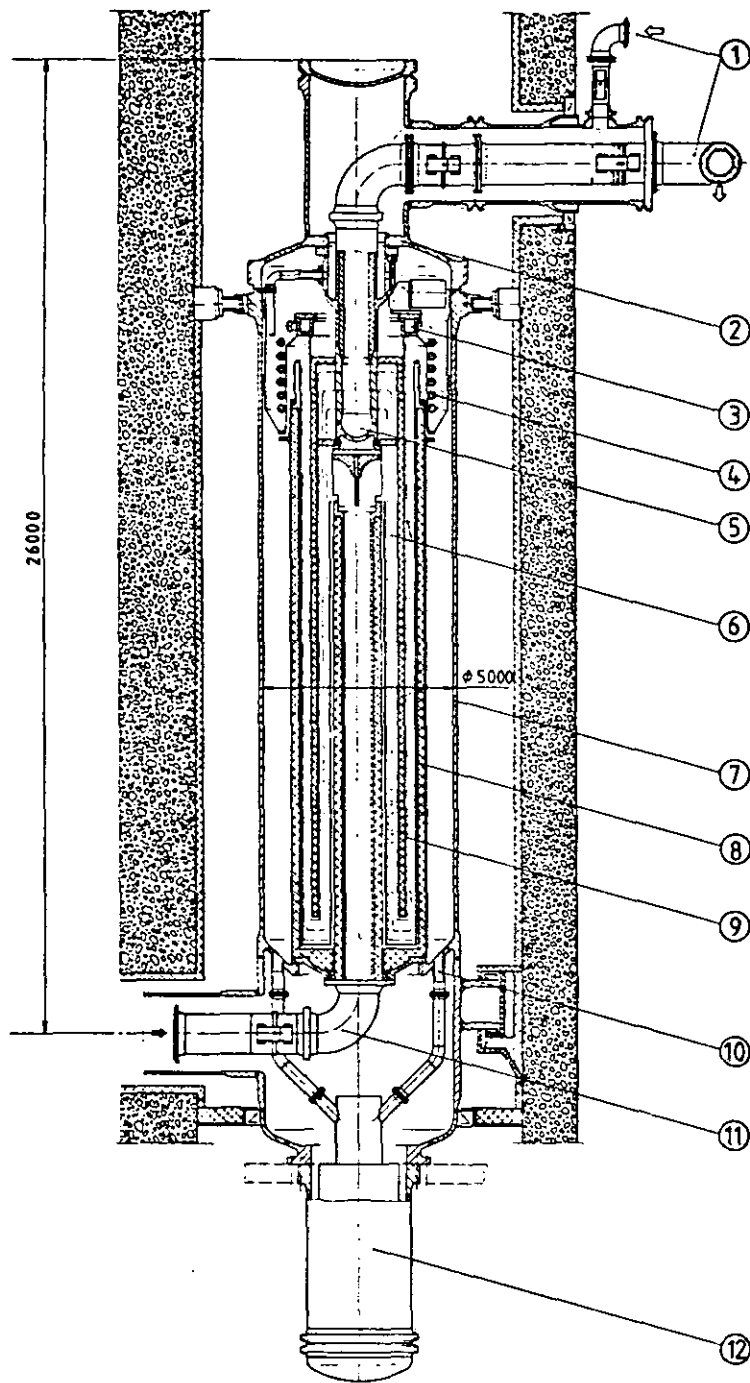


Abb. 2.2: Konstruktiver Aufbau des He/He-Zwischenwärmetauschers in Helix-Bauweise



- |                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| ① Sek.-Leistungsanschlüsse | ⑦ Druckbehälter        |
| ② Tragdeckel               | ⑧ Wärmetauschermantel  |
| ③ Sek.-Kaltgassammler      | ⑨ Strömungshemd        |
| ④ Sek.-Kaltgasführung      | ⑩ Prim.-Kaltgasführung |
| ⑤ Sek.-Heißgassammler      | ⑪ Prim.-Heißgasführung |
| ⑥ Rohrbündel               | ⑫ Gebläse              |

Abb. 2.3: Konstruktiver Aufbau des He/He-Zwischenwärmetauschers in U-Rohr-Kompaktbauweise

Fazit:

Bei der Nutzung des Hochtemperaturreaktors als Erzeugungssystem für Prozeßwärme werden metallische wärmetauschende Komponenten Arbeitstemperaturen oberhalb 800 °C ausgesetzt. Für diesen Anwendungsbereich fehlen im Sinne einer atomrechtlichen Genehmigung Regeln für die Komponentenauslegung, die Aussagen über Werkstoffe, konstruktive Gestaltung und Festigkeitsnachweise enthalten. Es wird die Struktur eines solchen Regelwerkes vorgeschlagen, das für die sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten, Röhrenspaltofen und He/He-Wärmetauscher, zur Anwendung kommen sollte. Dabei werden besondere Merkmale dieser Komponenten dargestellt. Bei der Auslegung stehen neben der Beherrschung der Primärspannungen die Versagensarten

- Kriechratcheting
- Kriechbeulen
- Kriechermüdung

im Vordergrund.

Durch weitgehende Verwendung von Standard-Bauteilen lassen sich die erforderlichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen auf wenige charakteristische geometrische Formen wie

- Rohr
- Zylinder
- Kegelschale
- Platte

und deren Verbindungen mit gegebenenfalls entsprechender Interaktion zurückführen.

Dokumentationen zu Kapitel 2:

- |   |  |                      |
|---|--|----------------------|
| - | Erläuterung der Konstruktion von<br>Komponenten einer PNP-Anlage       | GHT/IA;<br>Fischer   |
| - | Erläuterungen zum Projekt-Struktur-<br>plan und zum Projekt-Ablaufplan | KFA/IRW;<br>Penkalla |

### 3. Werkstoffverhalten bei hohen Temperaturen

Der Werkstoff einer Komponente ist im Betrieb verschiedenen Belastungen ausgesetzt, die einerseits zu Verformungen und Schädigungen der Komponente führen, andererseits die Werkstoffstruktur verändern können, was wiederum Einfluß auf die Belastbarkeit des Werkstoffs hat.

Mit steigender Temperatur nimmt die Festigkeit eines Werkstoffs ab. Zugleich vermindert sich die Strukturstabilität und umgebungsbedingte Einflüsse nehmen an Bedeutung zu.

Dieses Kapitel dient der Darstellung der Phänomene.

#### 3.1 Belastungsarten

Die Belastungen eines Werkstoffs im Betrieb können unterschieden werden in

- mechanische
- thermische und
- umgebungsbedingte

Belastungen. Die Reaktion der Werkstoffe richtet sich nach der Art der Belastungen.

Mechanische Belastungen sind systembedingte Kräfte und Momente oder zwangsweise aufgebrachte Verformungen (z. B. thermische Ausdehnung). Sie erzeugen im Werkstoffinnern Beanspruchungen; und zwar die Spannung als Kraft je Flächeneinheit und die Dehnung als Längenänderung je Längeneinheit.

Spannungen werden unterschieden nach der Art, wie sie hervorgerufen werden.



### - Primäre Spannungen

Primäre Spannungen sind solche Spannungen, die das Gleichgewicht mit äußeren Belastungen herstellen.

Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens ist ihr wesentliches Merkmal, daß bei einer (unzulässig großen) Steigerung der äußeren Lasten die Verformungen nach vollständiger Plastifizierung (zeitunabhängige Verformung) des Querschnitts wesentlich zunehmen, ohne sich hierbei selbst zu begrenzen.

Im HT-Bereich bewirkt zusätzlich das Kriechen (zeitabhängige Verformung), daß inelastische Verformungen anwachsen und die anstehende Belastung daher nur eine bestimmte Zeit ertragen werden kann.

### - Sekundäre Spannungen

Sekundäre Spannungen sind solche Spannungen, die durch Zwängungen, wie sie durch geometrische Unstetigkeiten, bei Verwendung von Werkstoffen unterschiedlichen Elastizitätsmoduls unter äußeren Lasten und infolge unterschiedlicher Wärmedehnungen entstehen.

Hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens ist ihr wesentlichstes Merkmal, daß sie auch im Falle des Überschreitens der Fließgrenze beim Ausgleich der Verformungsdifferenzen plastische Verformungen (zeitunabhängige Verformung) bewirken, die sich selbst begrenzen.

Im HT-Bereich bewirkt zusätzlich das Kriechen (zeitabhängige Verformung), daß sich die sekundären Spannungen abbauen. Bei Belastungswechseln führt dies zur Dehnungsakkumulation.

### - Spannungsspitzen

Spannungsspitzen sind solche Spannungsanteile, die der Summe von

primären und sekundären Spannungen (z. B. an örtlichen Unstetigkeiten) überlagert sind. Da sie nur in örtlich eng begrenzten Bereichen auftreten, haben sie keine merklichen Verformungen zur Folge und sind daher bei zeitunabhängigem Werkstoffverhalten nur für die Ermüdung und Sprödbbruchgefährdung von Bedeutung.

Im HT-Bereich sind die Spitzenspannungen in Verbindung mit primären und sekundären Spannungen trotz Relaxation im Hinblick auf Kriech-Ermüdungsversagen zu berücksichtigen.

Als thermische Belastung gilt das Temperaturniveau, auf welchem sich ein Werkstoff im Einsatz befindet. Bei hohen Temperaturen werden im Werkstoff jene Prozesse aktiviert, die das Werkstoffgefüge verändern. Dazu gehören insbesondere Veränderungen der

- Ausscheidungsmorphologie und
- Korngröße.

Die thermisch aktivierten Strukturveränderungen werden durch gleichzeitig wirkende mechanische Beanspruchungen zusätzlich beeinflusst und führen zu einer langzeitigen Veränderung der Werkstofffestigkeit.

Als umgebungsbedingte Belastungen sind Bestrahlung und umgebendes Betriebsmedium zu verstehen. Während die Strahlenbelastung für die hier zu betrachtenden Komponenten keine Rolle spielt, ist der Einfluß des Betriebsmediums bei hohen Temperaturen zu behandeln.

### 3.2 Kriechen

#### 3.2.1 Beschreibung des Phänomens

Die Antwort eines Werkstoffs auf eine Spannung ist die Dehnung, die elastisch oder inelastisch sein kann. Bei Temperaturen oberhalb  $0.4 T_s$  ( $T_s$  = Schmelztemperatur) wächst die inelastische Dehnung eines Werkstoffs unter Belastung kontinuierlich mit der Zeit. Dieser Effekt wird als Kriechen bezeichnet. Die Geschwindigkeit des Kriechens (Kriechrate) nimmt mit der angelegten Span-

nung und der Werkstofftemperatur zu. Abb. 3.1 zeigt im oberen Diagramm eine typische Kriechkurve, in der die bleibende Dehnung über der Zeit bei konstanter Spannung aufgetragen ist. Im unteren Diagramm ist der zeitliche Verlauf der Kriechrate dargestellt.

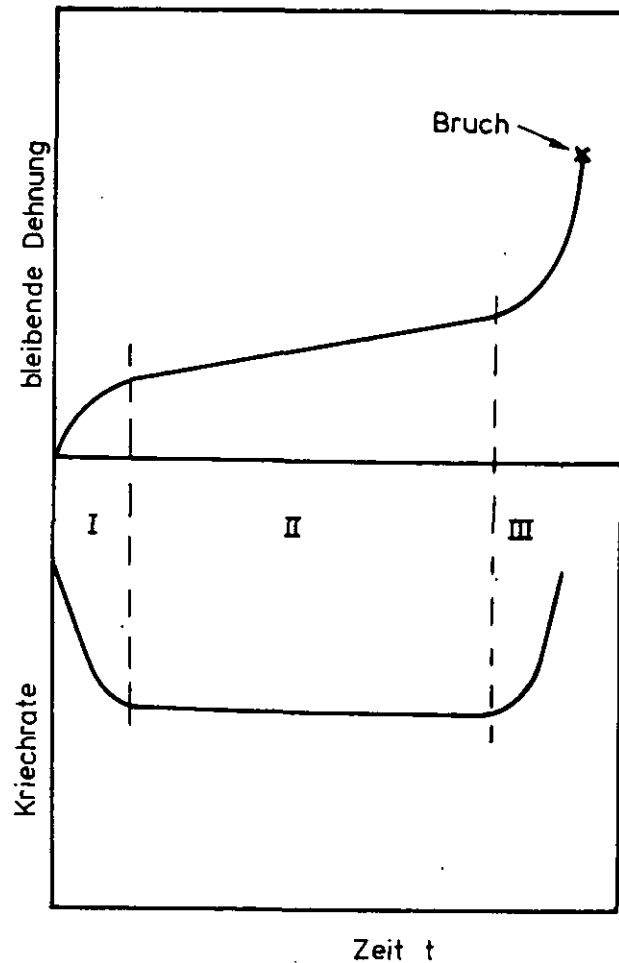


Abb. 3.1: Typische Kriechkurve eines metallischen Werkstoffs (oben). Der Verlauf der Kriechrate verdeutlicht die drei charakteristischen Kriechbereiche.

Die abgebildete Kriechkurve zeigt drei charakteristische Bereiche. Zu Beginn der Belastung tritt in Bereich I primäres Kriechen auf, bei welchem sich aufgrund anfänglicher Werkstoffverfestigung die Kriechrate verlangsamt. Im Bereich II, dem stationären oder sekundären Kriechen bleibt die Kriechrate nahezu konstant. Werkstoffverfestigung und -entfestigung stehen hier im Gleichgewicht. Im Bereich III liegt tertiäres Kriechen vor, in dem sich der Werkstoff durch Bildung und Wachstum von Rissen im Werkstoffgefüge stark entfestigt, bis er schließlich bricht.

### 3.2.2 Experimentelle Ermittlung des Kriechverhaltens

Das Kriechverhalten eines Werkstoffs wird in Laborversuchen durch einachsige Zugversuche unter konstanter Zuglast und bei konstanter Temperatur ermittelt. Dabei wird die während des Versuchs von der Zugprobe erreichte Dehnung entweder kontinuierlich aufgezeichnet oder bei Versuchsunterbrechungen in etwa gleichen Zeitintervallen durch Ausmessen der Proben ermittelt.

Die genaue Durchführung des Kriech- bzw. Zeitstandversuchs ist in DIN 50 118 und DIN 50 119 festgelegt.

### 3.2.3 Bestimmung der Zeitstandkennwerte

Die in den Zeitstandversuchen aufgenommenen Zeitdehnlinien sind die Grundlage zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten. Dazu werden die bei gleicher Temperatur und verschiedenen Spannungen aufgenommenen Kriechkurven in einem Bild zusammengefaßt, wie es im oberen Teil von Abb. 3.2 dargestellt ist, wobei der Zeitmaßstab logarithmisch gewählt wird. Die Bruchpunkte werden zu einer Zeitbruchlinie verbunden. Zugleich wird eine Dehngrenze, hier die 1%-Dehngrenze, als waagerechte Linie eingezeichnet.

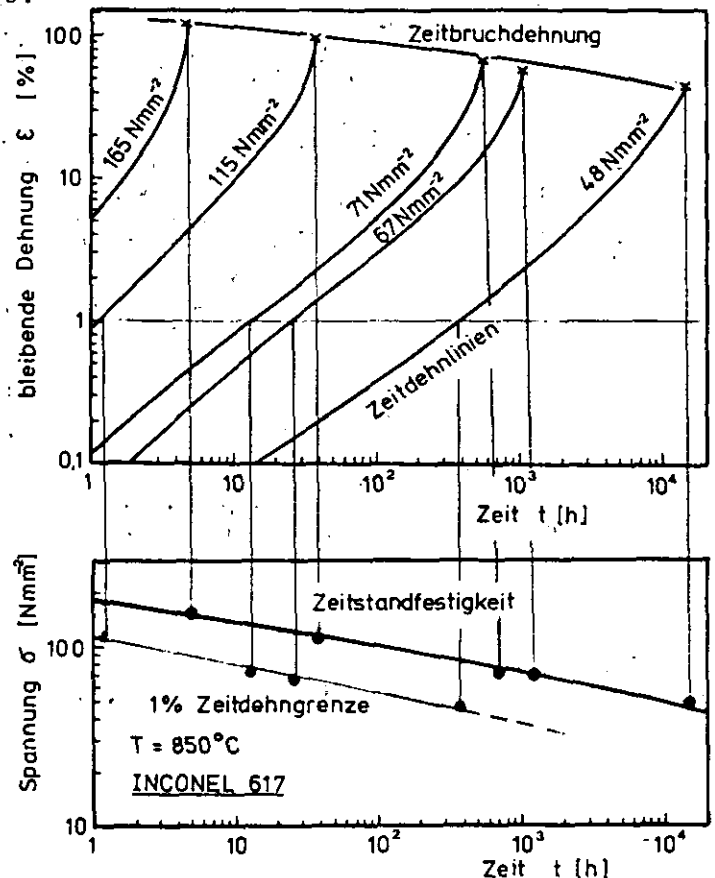


Abb. 3.2: Ermittlung der Kennwerte "1%-Zeitdehngrenze" und "Zeitstandfestigkeit" aus Kriechkurven, die bei gleicher Temperatur aufgenommen wurden; hier am Beispiel des Werkstoffs Ni Cr 22 Co 12 Mo (INCONEL 617).

Die Schnittpunkte aller Kriechkurven mit der Zeit-Bruch-Linie liefern in dem unteren Folgediagramm, in dem die Spannung über der Zeit aufgetragen ist, die Isotherme der Zeitstandfestigkeit und die Schnittpunkte mit der 1%-Dehngrenze liefern in gleicher Weise die Isotherme der 1%-Zeitdehngrenze.

Dieses Verfahren, für hinreichend viele Temperaturen im interessierenden Temperaturbereich angewandt, liefert den erforderlichen Umfang an Zeitstandkennwerten, die Basis der zeitabhängigen Auslegungskennwerte sind.

In Abb. 3.3 ist der derzeitige Datenstand am Beispiel des Werkstoffs NiCr 22 Co 12 Mo wiedergegeben, worin mehrere Chargen zusammengefaßt sind, so daß eine beträchtliche Streuung der Einzelwerte entsteht.

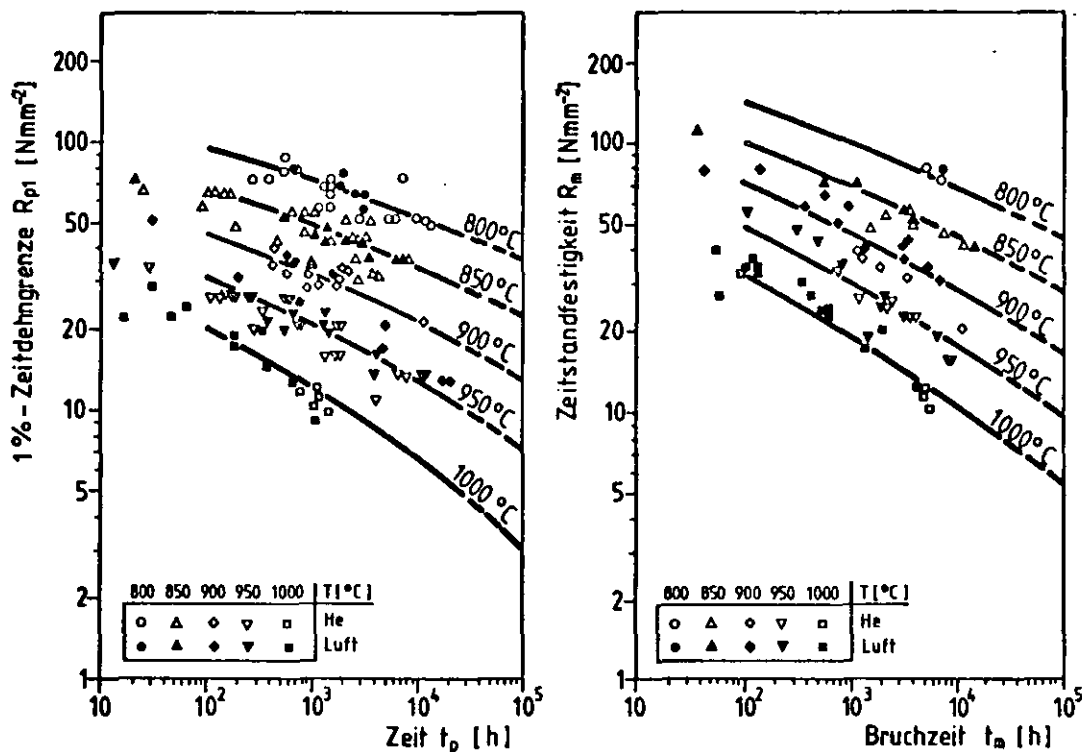


Abb. 3.3: Streubandauswertung der Isothermen der 1%-Zeitdehngrenze und der Zeitstandfestigkeit des Werkstoffs Ni Cr 22 Co 12 Mo.

### 3.2.4 Extrapolation von Zeitstandkennwerten, Mittel- und Mindestwerte

Für die Auslegung von Komponenten werden Zeitstandkennwerte bis zur angestrebten Betriebszeit und gegebenenfalls länger benötigt. Da diese durch ein vorlaufendes Werkstoffprogramm nicht in vollem Umfang gemessen werden können, müssen sie durch Verfahren zur Extrapolation der Zeitstandkennwerte bestimmt werden:

- graphische Verfahren
- Verfahren auf Basis von Zeit-Temperatur-Parametern
- Verfahren auf Basis von Stoffgesetzen.

Sämtliche Verfahren sind mit Unsicherheiten behaftet.

Das graphische Verfahren legt durch alle Punkte der Zeitstandisothermen Ausgleichskurven, wobei jede Charge zunächst einzeln betrachtet wird. Die Erfassung mehrerer Chargen erfolgt dann durch Mittelung der jeweiligen Ausgleichskurven, wodurch unterschiedliche Datenbelegung bei einzelnen Chargen nur einen geringen Effekt auf das Endergebnis haben. Das graphische Verfahren ist stark abhängig vom Erfahrungshintergrund des Auswerterers.

Extrapolationen mit Zeit-Temperatur-Parametern nutzen einen physikalischen Zusammenhang zwischen der Laufzeit und der Temperatur und definieren einen von Zeit und Temperatur abhängigen Parameter, der selbst nur eine Funktion der Spannung ist. Es wird als Ausgleichskurve eine sogenannte Meisterkurve ermittelt, aus der wiederum die Zeitstandisothermen konstruiert werden. Die Zuverlässigkeit dieser Extrapolationsmethode hängt davon ab, inwieweit der angenommene physikalische Zusammenhang zwischen Zeit und Temperatur von dem Werkstoff erfüllt ist.

Extrapolation mit Stoffgesetzen wäre zwar die exakteste Methode, jedoch müssen die Stoffgesetze gerade in dem zu extrapolierenden Zeit- und Spannungsbereich bekannt sein. Dies ist derzeit nicht oder nur unzureichend erfüllt.

Die bei allen Extrapolationsverfahren ermittelten Ausgleichskurven stellen den Mittelwert der Zeitstandisothermen dar. Zur Ermittlung eines Mindestwertes ist die Streuung der Meßpunkte um den Mittelwert zu berücksichtigen. Zur Bestimmung des Mindestwertes wird entsprechend DIN 50 117 das Konfidenzintervall als das 1,65-fache der Standardabweichung gewählt und das Konfidenzintervall vom Mittelwert subtrahiert. Damit ergibt sich eine 95 %-ige Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Ergebnis einer Einzelmessung über dem Mindestwert liegt.

### 3.2.5 Stoffgesetze

Mit Stoffgesetzen zum Kriechen werden die Zusammenhänge zwischen Temperatur, Spannung, Dehnung und deren zeitlichen Verlauf beschrieben. Sie sind Voraussetzungen zur Durchführung inelastischer oder daraus abgeleiteter vereinfachter Analysen. Entsprechend der tatsächlichen Belastungsbedingungen ist für die inelastische Analyse zumeist die mehrachsige Formulierung von Stoffgesetzen von Bedeutung. Da das Stoffgesetz experimentell jedoch im einachsigen Kriechversuch bestimmt wird, müssen geeignete Modelle zur Übertragung einachsiger auf mehrachsige Belastungsbedingungen angewendet werden.

Stoffgesetze zum Kriechen lassen sich unterteilen in

- Beschreibung der Dehnung als Funktion der Zeit
- Beschreibung der Dehnrate als Funktion der Spannung.

In beiden Fällen ist die Temperatur Parameter.

Die Beschreibung der Dehnrate als Funktion der Spannung ist in der Regel von größerer Bedeutung, da sich die Dehnung als Funktion der Zeit daraus unmittelbar ableiten läßt. In den Fällen, in denen der primäre Dehnungsanteil im Vergleich zur gewählten Dehngrenze (z. B. 1 %) klein ist, ist die Beschreibung der stationären Dehnrate in Abhängigkeit von der Spannung wichtig. Von den vielen existierenden Ansätzen findet das Norton'sche Kriechgesetz in der Form von

$$\dot{\epsilon}_s = k \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n$$

mit  $\dot{\epsilon}_s$  = stationäre Kriechrate

$\sigma$  = angelegte Spannung

$E$  = Elastizitätsmodul

$k, n$  = werkstoffspezifische Konstanten

die häufigste Anwendung. Bei mehrachsiger Formulierung ergibt sich unter Zugrundelegen der Volumenkonstanz für die verschiedenen Richtungen der Dehnraten

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} k^* \sigma_v^{n-1} \sigma_{ij}^*$$

mit  $\sigma_v$  = Vergleichsspannung nach Mises

$\sigma_{ij}^*$  = Spannungsdeviator

$k^* = k/E^n$ .

Abb. 3.4 zeigt das Ergebnis der Überprüfung einer Charge, des Werkstoffs INCONEL 617 auf die Gültigkeit des Norton'schen Kriechgesetzes. Soweit im Dehnraten-Spannungs-Diagramm Geraden vorliegen,

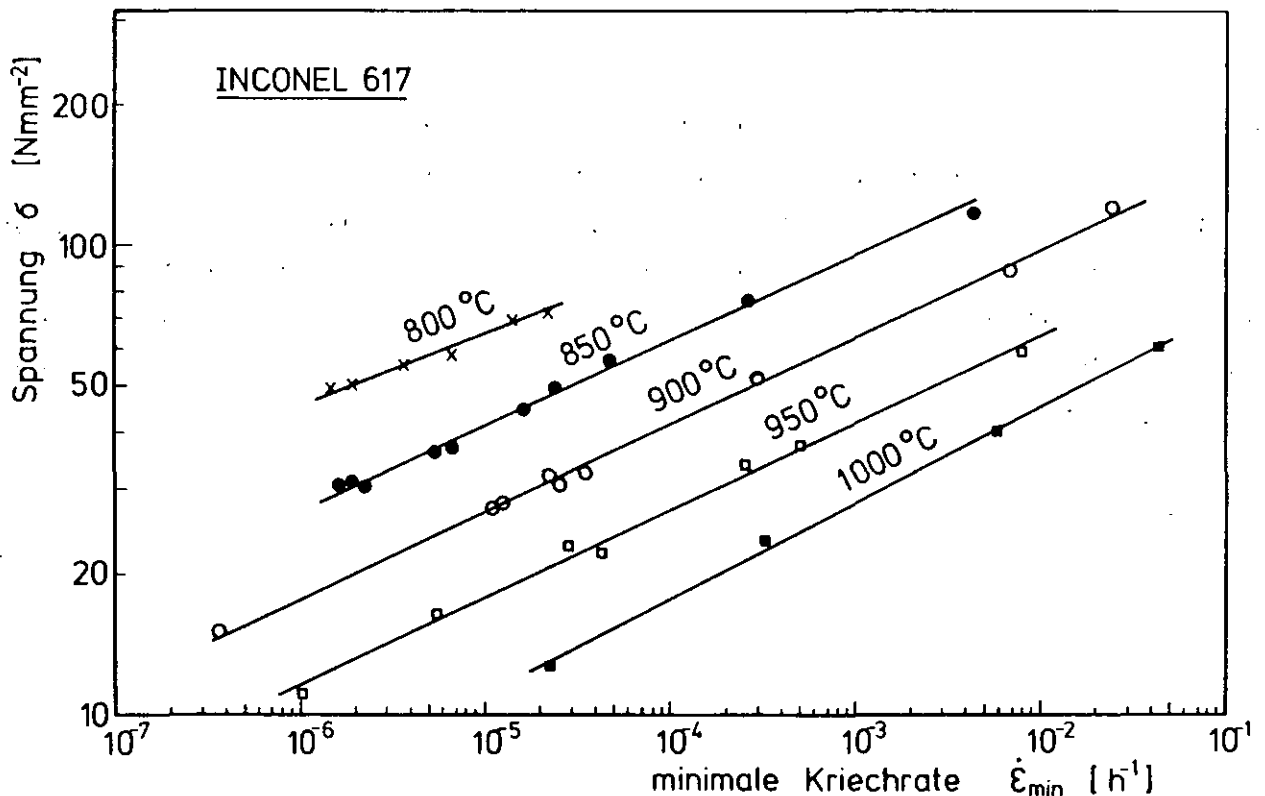


Abb. 3.4: Abhängigkeit der minimalen Kriechrate von der Spannung für verschiedene Temperaturen am Beispiel einer Versuchsschmelze des Werkstoffs Ni Cr 22 Co 12 Mo (INCONEL 617).



kann das Norton'sche Kriechgesetz als erfüllt gelten. Dies ist bis zu Laufzeiten von  $10^4$  h und Temperaturen bis 950 °C ausreichend belegt. Inwieweit dies ebenfalls für kleinere Spannungen und damit längere Laufzeiten auch in Verbindung mit Strukturänderungen des Werkstoffs zutrifft, muß noch überprüft werden.

### 3.2.6 Kriechen unter wechselnder Belastung

Ändert sich während des Betriebs einer Komponente das Belastungsniveau, so sind das resultierende

- Dehnverhalten
- Bruchverhalten

aus den Einzelbelastungen zu ermitteln.

Für das resultierende Dehnverhalten existieren verschiedene Hypothesen. Die wichtigsten sind die

- Dehnverfestigungsregel
- Zeitverfestigungsregel
- Energieverfestigungsregel

In allen Regeln werden die resultierenden Kriechkurven aus den Kriechkurven der Einzelbelastungen zusammengesetzt, wobei jedoch die Anschlußpunkte an die folgende Kriechkurve unterschiedlich sind. Abb. 3.5 demonstriert die Regeln am Beispiel zweier aufeinanderfolgender Belastungen. Bei der Dehnverfestigungsregel sind die Anschlußdehnungen der Einzelkriechkurven gleich, bei der Zeitverfestigungsregel die Anschlußzeiten und bei der Energieverfestigungsregel die Anschlußenergien, die sich aus dem Produkt von Spannung und Dehnung errechnen.

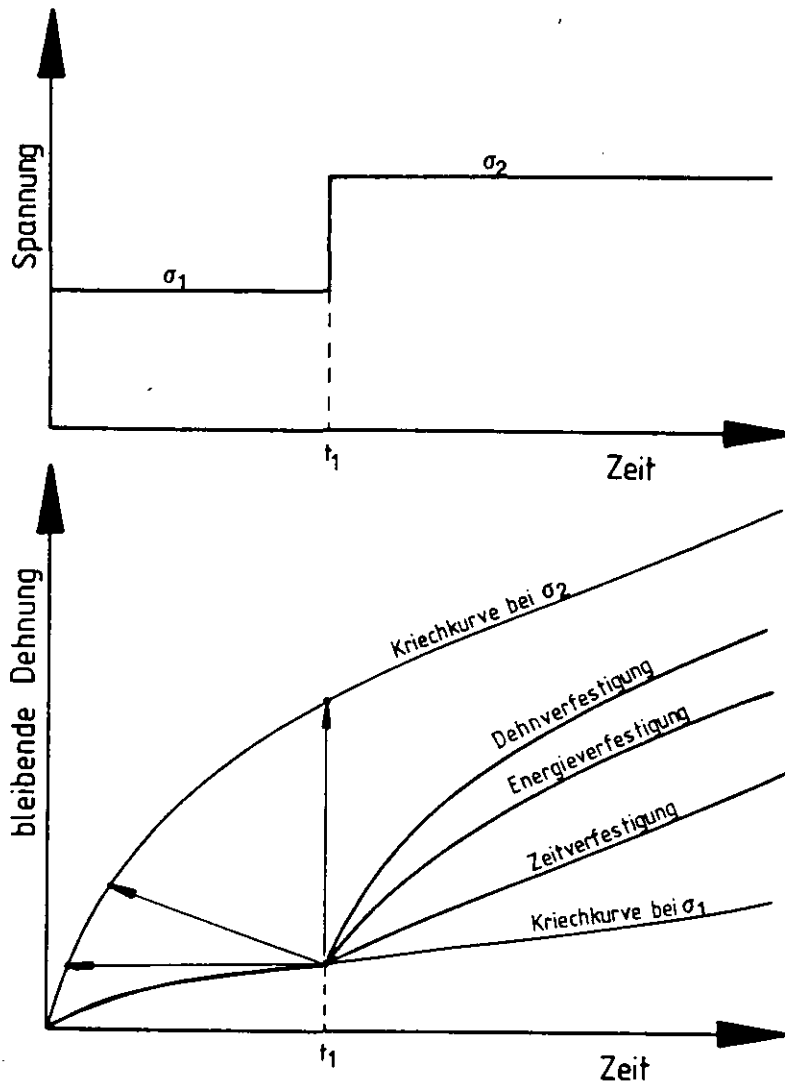


Abb. 3.5: Konstruktion der resultierenden Kriechkurve nach verschiedenen Verfestigungsregeln bei Änderung der stationären Belastung am Beispiel zweier aufeinander folgenden Belastungsniveaus.

Die resultierende Bruchzeit ergibt sich aus dem Verbrauch an Lebensdauer und wird mit der Robinson-Regel bestimmt. Darin wird die Dauer  $t_i$ , in der das Beanspruchungsniveau  $\sigma_i$  wirkt, mit der sich aus  $\sigma_i$  ergebenden Bruchzeit  $t_{Bi}$  ins Verhältnis gesetzt und als Lebensdaueranteil oder Kriecherschöpfung bezeichnet. Die Aufsummierung der Lebensdaueranteile aller Beanspruchungsniveaus liefert den gesamten Lebensdauerverbrauch bzw. Kriecherschöpfungsgrad

$$U_k = \sum_i \frac{t_i}{t_{Bi}}$$

und der Bruch wird bei  $U_k = 1$  erwartet.

Eine experimentelle Überprüfung der Anwendbarkeit der Robinson-Regel für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C ist bisher nicht erfolgt. Ergebnisse aus Versuchen bei niedrigeren Temperaturen weisen jedoch darauf hin, daß ein Bruch schon bei  $U_k$  kleiner als 1 eintreten kann.

### 3.3 Ermüdung

#### 3.3.1 Beschreibung des Phänomens

Ein Werkstoff, der zyklischen Beanspruchungen unterliegt, ermüdet. Oberhalb einer kritischen Zyklenzahl setzt er der Beanspruchung einen immer geringer werdenden Widerstand entgegen. Bei der kritischen Zykluszahl entstehen Anrisse an der Werkstoffoberfläche, die mit jedem Belastungszyklus weiter in den Werkstoff hineinwachsen, wodurch der tragende Restquerschnitt immer geringer wird. Ist dieser so klein, daß die Beanspruchung die Festigkeit des Werkstoffs übersteigt, kommt es zum Gewaltbruch.

Die Ermüdung wird unterschieden nach spannungs- und dehnungsinduziert sowie nach Hochlastwechselzahlermüdung (HCF = High cycle fatigue) und Niedriglastwechselzahlermüdung (LCF = Low cycle fatigue). Ermüdung im Hochlastwechselbereich wird durch Schwingungsbeanspruchungen hervorgerufen, wie sie z. B. in Gasführungen auftreten können. An- und Abfahrvorgänge und Betriebsschwankungen rufen weitgehend thermisch induzierte Dehnwechsel hervor, die Ermüdung im Niedriglastwechselbereich bewirken.

Für Komponenten im Hochtemperaturbereich ist das LCF gegenüber dem HCF für die Auslegung maßgebend, so daß sich die folgende Darstellung darauf beschränkt.

### 3.3.2 Experimentelle Ermittlung des Ermüdungsverhaltens

LCF-Versuche zur Bestimmung dehnungsinduzierter Ermüdung eines Werkstoffs werden an Normproben unter einachsiger Zug-Druck-Beanspruchung durchgeführt. Die Wechseldehnung wird mit konstanter Dehngeschwindigkeit aufgebracht, wobei die Dehnschwingbreite konstant gehalten wird. Die durch die zwangsweise aufgebrachte Dehnung induzierte "Sekundärspannung" wird über der Dehnung als zyklisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen. Die Durchführung des dehnungsgesteuerten LCF-Versuchs regelt die amerikanische Norm ASTM Des. 606-80. Entsprechende deutsche Normen liegen nicht vor.

### 3.3.3 Bestimmung der Lebensdauerkurven

Die in den LCF-Versuchen aufgenommenen zyklischen Spannungs-Dehnungskurven sind die Grundlage zur Ermittlung der Lebensdauerkurven, aus welchen wiederum die Auslegungskurven für Ermüdung abgeleitet werden. Abb. 3.6 zeigt das Schema der Auswertung. Zunächst werden für jeden Einzelversuch die maximal erreichten Spannungen in Abhängigkeit von der Zyklenzahl entnommen und als Verfestigungskurve dargestellt.

Im nächsten Schritt werden die Verfestigungskurven zusammengefaßt, die bei gleicher Temperatur und verschiedenen Dehnungsschwingbreiten aufgenommen wurden. Dort, wo die Verfestigungskurven vom Plateau nach unten abknicken, erfolgt im Versuch der erste makroskopische Anriß. Die Anrißpunkte und die Bruchpunkte werden in das untere Diagramm projiziert, in welchem die Dehnungsschwingbreite über der Lastwechselzahl aufgetragen ist.

Die Verbindung der übertragenen Punkte liefert die Lebensdauerkurven für den Anriß und den Ermüdungsbruch. In Abb. 3.7 sind die Lebensdauerkurven für den Ermüdungsbruch am Beispiel des Werkstoffs X 10 NiCrAlTi 32 20 (INCOLOY 800 H) dargestellt. Die Ergebnisse stammen von Messungen an verschiedenen Chargen, worauf die relativ große Streuung der Einzelwerte zurückzuführen ist.

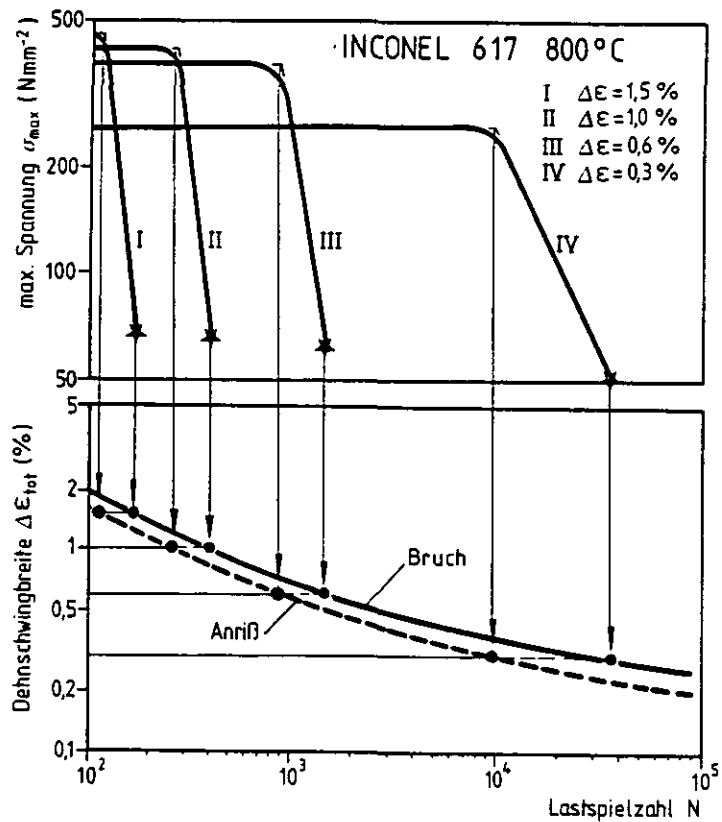
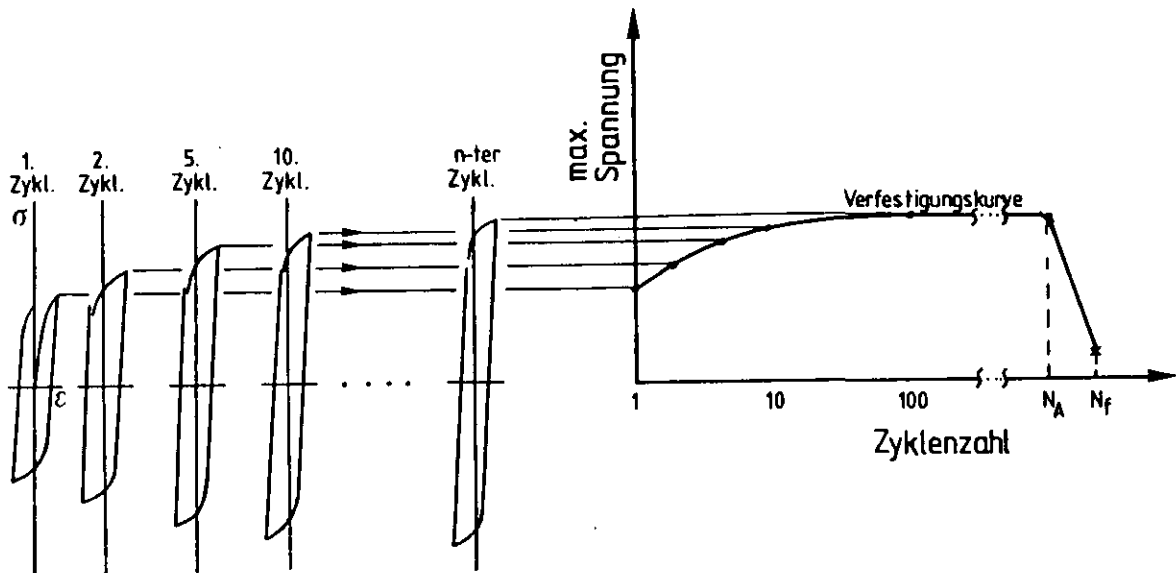


Abb. 3.6: Schema der Auswertung von LCF-Versuchen. Aus der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve wird die Verfestigungskurve ermittelt (obiges Bild). Aus allen bei gleicher Temperatur ermittelten Verfestigungskurven ergeben sich die Lebensdauerkurven durch Projektion der Anriß- und Bruchpunkte (rechtes unteres Bild am Beispiel Ni Cr 22 Co 12 Mo)

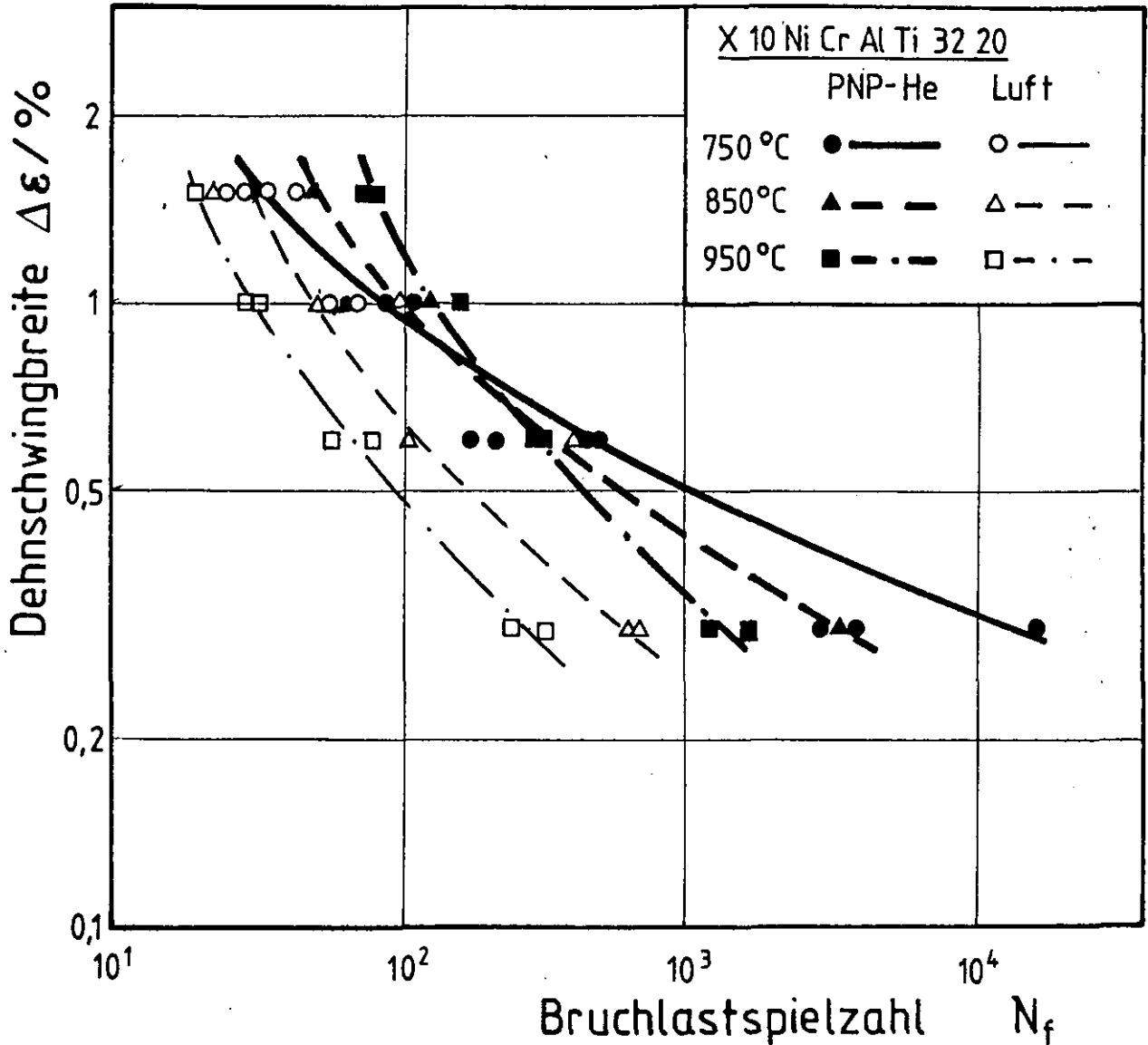


Abb. 3.7: Lebensdauerkurven für den Werkstoff X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 (INCOLOY 800H) im Temperaturbereich 750 °C bis 950 °C.

### 3.3.4 Besonderheiten bei hohen Temperaturen

Im Gegensatz zum Kriechen tritt Ermüdung in allen Temperaturbereichen auf. Jedoch wirkt sich die Zeitabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften bei hohen Temperaturen als Überlagerung zum rein zeitunabhängigen zyklischen Plastifizieren aus. Dies wird deutlich am Verlauf der Verfestigungskurve und dem Einfluß der Dehngeschwindigkeit, mit welcher der LCF-Versuch gefahren wird.

Eine bei Raumtemperatur aufgenommene Verfestigungskurve zeigt nach wenigen Zyklen einen Anstieg der maximalen Spannung, gefolgt von einem langen Plateau (Abb. 3.8). Der Spannungsanstieg zeigt eine Verfestigung des Werkstoffs in der Anfangsphase des Versuchs. Die entfestigende Wirkung hoher Temperaturen vermindert diesen Spannungsanstieg und führt schließlich sogar zu einem anfänglich starken, später schwachen Spannungsabfall, wobei auch Anriß und Bruch deutlich früher auftreten.

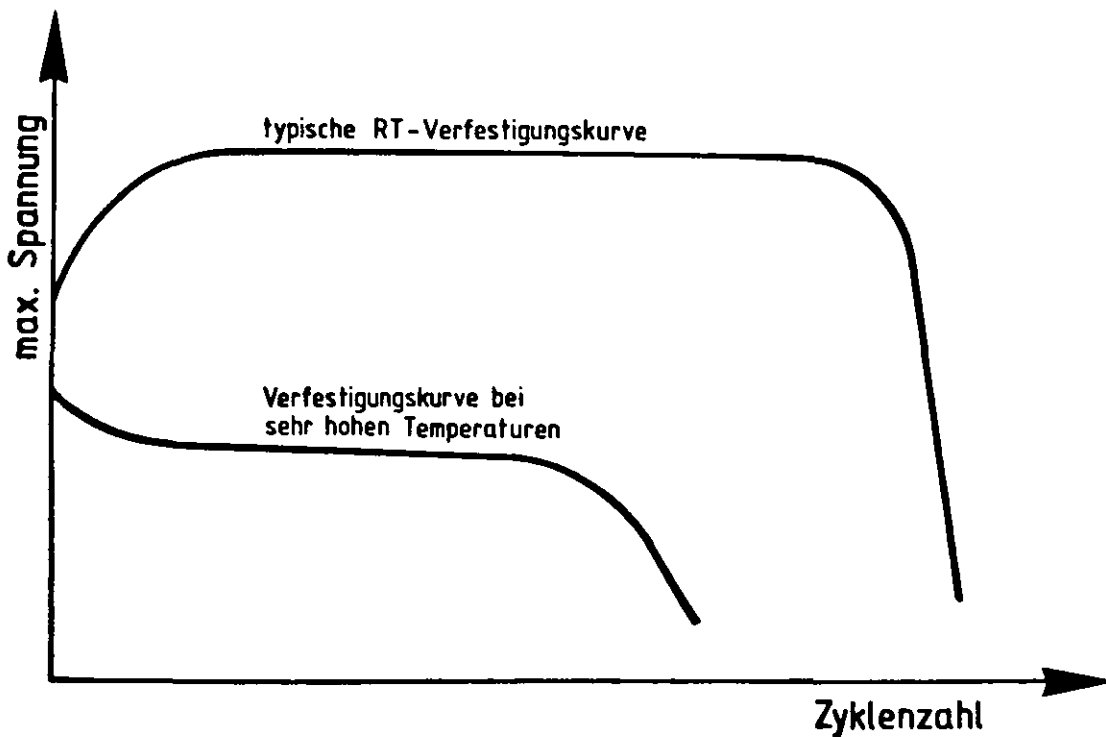


Abb. 3.8: Schematischer Verlauf der Verfestigungskurven bei Raumtemperatur und bei sehr hohen Temperaturen. Die entfestigende Wirkung des Kriechens führt zu einem Abfall der maximalen Spannung während der ersten Zyklen des LCF-Versuchs.

Bei Raumtemperatur ist die Verfestigungskurve nicht - oder nur in geringem Maße - von der Dehngeschwindigkeit abhängig. Bei hohen Temperaturen hingegen überlagert sich der zeitunabhängigen zyklischen Dehnung das Kriechen. Dies führt zu einer Verringerung der maximalen Spannung (Kriechrelaxation). Bei geringen Dehngeschwindigkeiten und hohen Temperaturen wird das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten durch das Kriechen bestimmt.

Abb. 3.9 zeigt den Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die maximale Spannung für die Werkstoffe X 10 NiCrAlTi 32 20 und NiCr 22 Co 12 Mo bei sonst gleichen Versuchsbedingungen. Je geringer die Dehngeschwindigkeit ist, um so eher führt das Kriechen dazu, daß die maximale Spannung auf ein niedriges Maß relaxiert.

Das Abknicken der Kurve für NiCr 22 Co 12 Mo bei wachsender Dehngeschwindigkeit zeigt, daß sich der Einfluß des Kriechens vermindert.

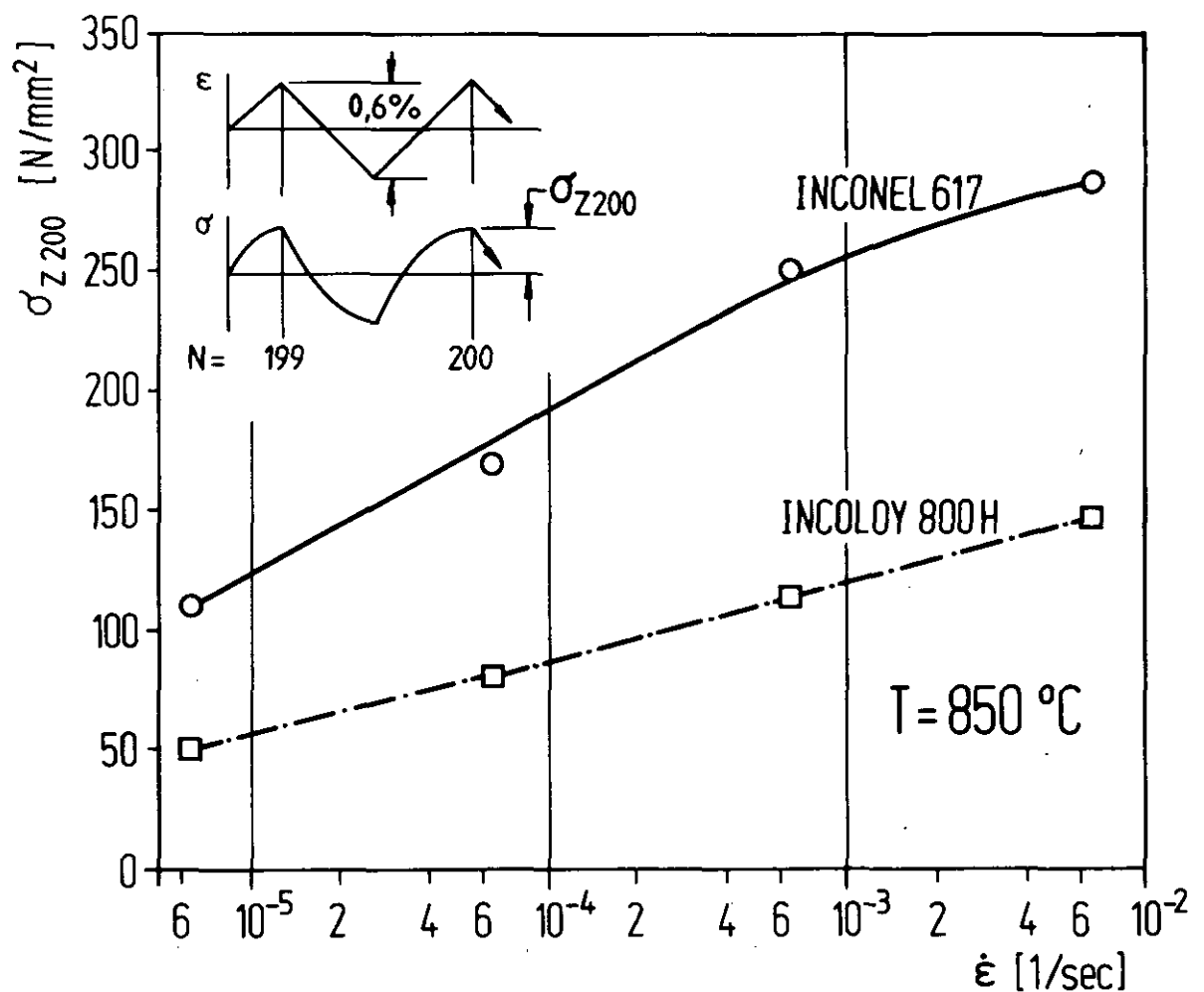


Abb. 3.9: Abhängigkeit der maximalen Spannung des 200. Zyklus von der Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  im LCF-Versuch.



### 3.3.5 Mathematische Beschreibung

Stoffgesetze zur Ermüdung beschreiben das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten unter Verfestigung. Von größerer Bedeutung für den Festigkeitsnachweis sind Formulierungen der Stoffgesetze für mehrachsige Belastungsfälle, doch werden die Stoffgesetze wie beim Kriechen zumeist anhand von Ergebnissen aus einachsigen Versuchen abgeleitet. Es bedarf daher geeigneter Modelle zur Übertragung einachsiger auf mehrachsige Beanspruchungen.

Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter zyklischen Beanspruchungen werden die im Versuch ermittelte zyklische Spannungs-Dehnungskurve idealisiert, wie dies in Abb. 3.10 dargestellt ist, und elastische und plastische Dehnungs- bzw. Spannungsanteile ermittelt. Die Verfestigung wird eingeteilt in

- isotrope Verfestigung
- kinematische Verfestigung.

Bei isotroper Verfestigung wächst die elastische Spannungsschwingbreite mit jedem Zyklus an, wie es am Anfang der Verfestigungskurve zu erkennen ist. Dies ist gleichbedeutend mit einem Anwachsen der zyklischen Fließgrenze. Im Fall der kinematischen Verfestigung bleibt die Spannungsschwingbreite konstant. In der Verfestigungskurve des einachsigen Versuchs stellt sich dies als Plateau dar und auch die zyklische Fließgrenze bleibt konstant.

Stoffgesetze zur Ermüdung dienen der Beschreibung dieser beiden Verfestigungsregeln, wobei für mehrachsige Beanspruchungen die Fließgrenze durch die von Mises'sche Fließfläche ersetzt wird und deren Verhalten hinsichtlich Form, Größe und Lage diskutiert wird. Während sich bei isotroper Verfestigung die Fließfläche bei gleichbleibender zentrischer Lage vergrößert, ändert sich bei kinematischer Verfestigung die Lage der Fließfläche, nicht aber deren Form und Größe.

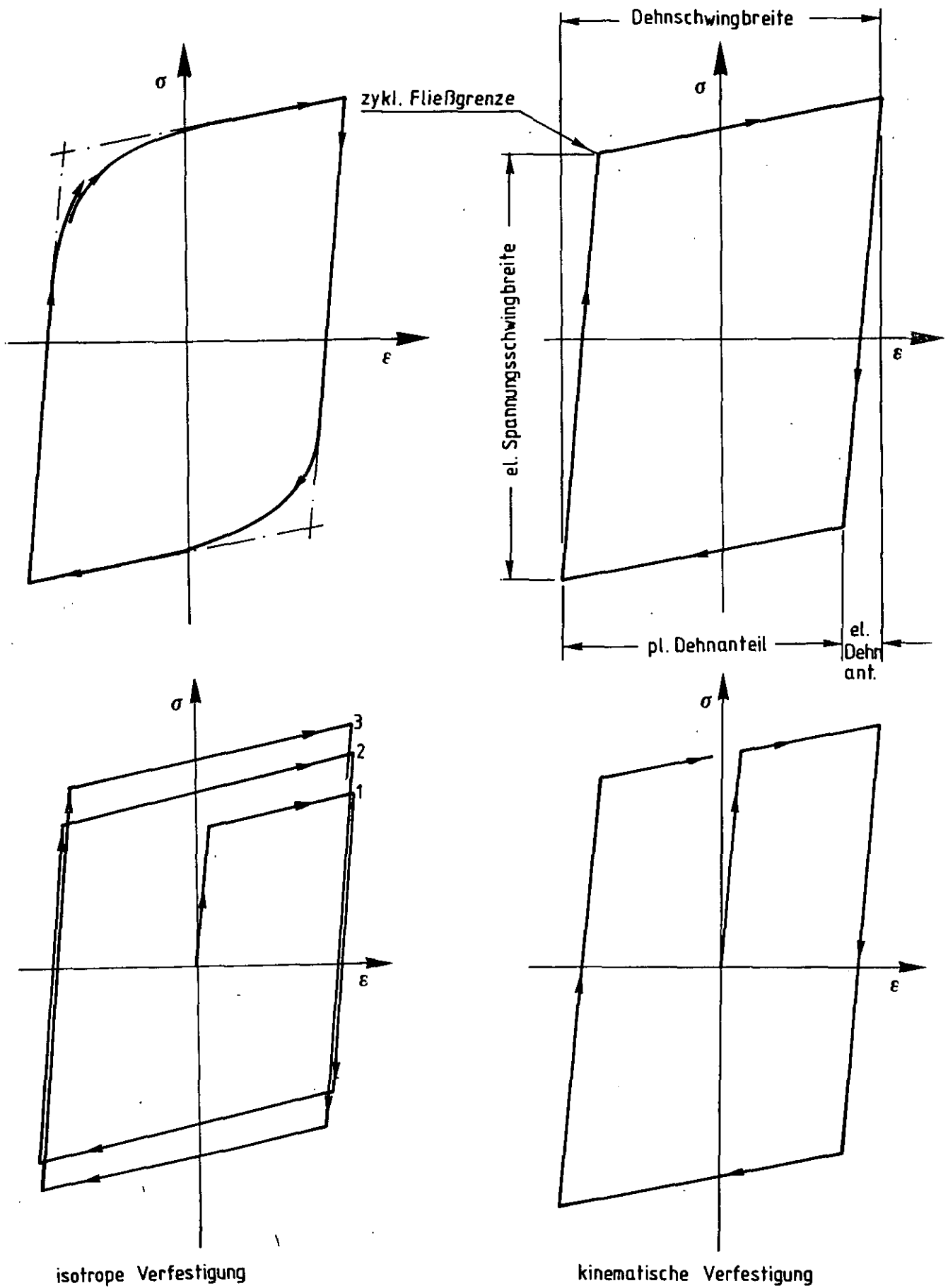


Abb. 3.10: Schematisierung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve und deren Verlauf bei isotroper und kinematischer Verfestigung.

Während im Bereich niedriger Temperaturen und/oder hoher Dehngeschwindigkeiten das zyklische Verformungsverhalten durch die Verfestigungshypothesen befriedigend erklärt wird, ist überlagertes Kriechen bei hohen Temperaturen bisher nicht erfaßt und stellt die größten Schwierigkeiten bei der Formulierung von Stoffgesetzen dar.

### 3.3.6 Ermüdung bei zyklischen Beanspruchungen mit wechselnden Dehnschwingbreiten

Der tatsächliche Betrieb einer Komponente bringt zyklische Belastungen mit wechselnden Dehnschwingbreiten und Dehngeschwindigkeiten mit sich, für die die ertragbare Lastzyklenzahl zu bestimmen ist.

Zur Berechnung der ertragbaren Lastzyklen wird nach der Regel von Palmgren-Miner ein Schadensanteil gebildet, der sich für jedes Beanspruchungsniveau aus dem Verhältnis von tatsächlicher Lastspielzahl zu Bruchlastspielzahl ergibt. Die Summe der Schadensanteile über alle Belastungsniveaus

$$U_k = \sum_i \frac{N_i}{N_{f_i}}$$

ergibt den Werkstofferschöpfungsgrad durch Ermüdung, und bei  $U_k = 1$  ist der Ermüdungsbruch zu erwarten.

Eine Überprüfung der Palmgren-Miner-Regel für Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C auf experimenteller Grundlage ist bisher nicht erfolgt. Jedoch lassen die überlagerten Kriecheffekte erwarten, daß diese Regel modifiziert werden muß.

### 3.4 Kurzzeiteigenschaften (einachsiger Zugversuch)

#### 3.4.1 Beschreibung des Phänomens

Mit den Kurzzeiteigenschaften wird das zeitunabhängige Werkstoffverhalten unter mechanischer Beanspruchung beschrieben. Das zeitunabhängige Verformungsverhalten ist bis zur Proportionalitätsgrenze elastischer Natur. Bei größerer Beanspruchung treten elastische und plastische (zeitunabhängige, bleibende) Verformungen auf. Bei einer kritischen Beanspruchungsgrenze, der Zugfestigkeit, kommt es zum Werkstoffversagen, zum Bruch.

Im Bereich plastischer Verformung verfestigt sich der Werkstoff, so daß im Gegensatz zum Kriechen bei konstanter Spannung die Dehnung zeitlich konstant bleibt. Da sich jedoch im Hochtemperaturbereich allen Verformungsvorgängen das Kriechen überlagert, ergeben sich einige Schwierigkeiten bei der Interpretation und Auswertung von Kurzzeiteigenschaften bei Temperaturen oberhalb 800 °C, die in Abschnitt 3.4.4 erläutert werden.

#### 3.4.2 Experimentelle Ermittlung der Kurzzeiteigenschaften

Die Kurzzeiteigenschaften eines Werkstoffs werden im einachsigen (Warm-) Zugversuch ermittelt. Dabei wird eine Normzugprobe bei konstanter Temperatur unter kontinuierlicher Lasterhöhung gedehnt. Die Lasterhöhung kann so erfolgen, daß sich

- konstante Dehngeschwindigkeit oder
- konstante Spannungsänderungsgeschwindigkeit

ergeben. Während des Versuchs werden die Last und die Probenverlängerung aufgezeichnet und daraus das monotone Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt.

Die Durchführung und Auswertung des einachsigen Warmzugversuchs und die Grenzen der Dehn- und Spannungsänderungsgeschwindigkeit sind in der DIN 50 145 festgelegt. Jedoch wird darin dem Bereich sehr hoher Temperaturen nicht Rechnung getragen.

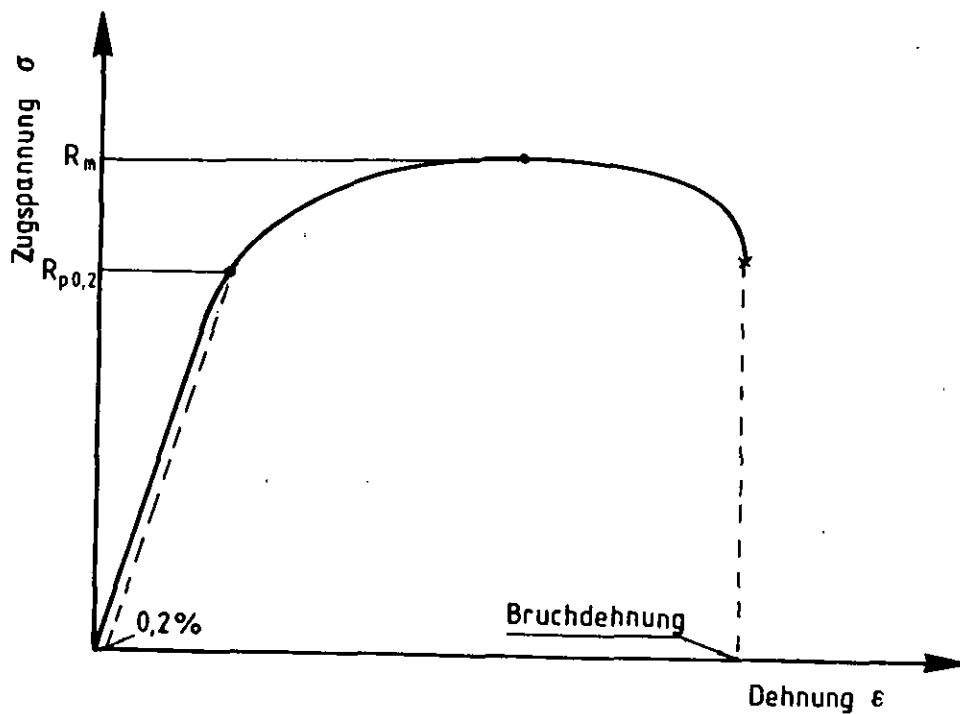


Abb. 3.11: Verlauf der Spannungs-Dehnungskurve im Zugversuch und Ermittlung der Kurzzeit-Kennwerte. Die Zugspannung bezieht sich auf den Anfangsquerschnitt der Probe.

### 3.4.3 Bestimmung der Kurzzeitkennwerte

Aus den bei verschiedenen Temperaturen ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagrammen werden als Kennwerte die

- 0,2% Dehngrenze  $R_{p\ 0,2}$
- Zugfestigkeit  $R_m$

entnommen, wie dies in Abb. 3.11 dargestellt ist.

#### 3.4.4 Besonderheiten bei hohen Temperaturen

Bei hohen Temperaturen werden die Ergebnisse des Warmzugversuchs abhängig von der Art der Versuchsführung - dehnungs- oder spannungsgesteuert - und von der Geschwindigkeit der Steuergröße. Abb. 3.12 zeigt Spannungs-Dehnungskurven von Raumtemperatur- und Warmzugversuchen an dem Werkstoff NiCr 22 Fe 18 Mo mit konstanter Dehnrage. Die Raumtemperaturkurve (RT) zeigt den typischen Verlauf mit monotoner Verfestigung, die auch noch an der bei 750 °C gemessenen Kurve beobachtet werden kann. Bei 950 °C zeigt die Spannungs-Dehnungskurve nach anfänglicher Verfestigung und darauf folgender Entfestigung ein Spannungsplateau, dessen Wert von der Größe der Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}_0$  abhängt.

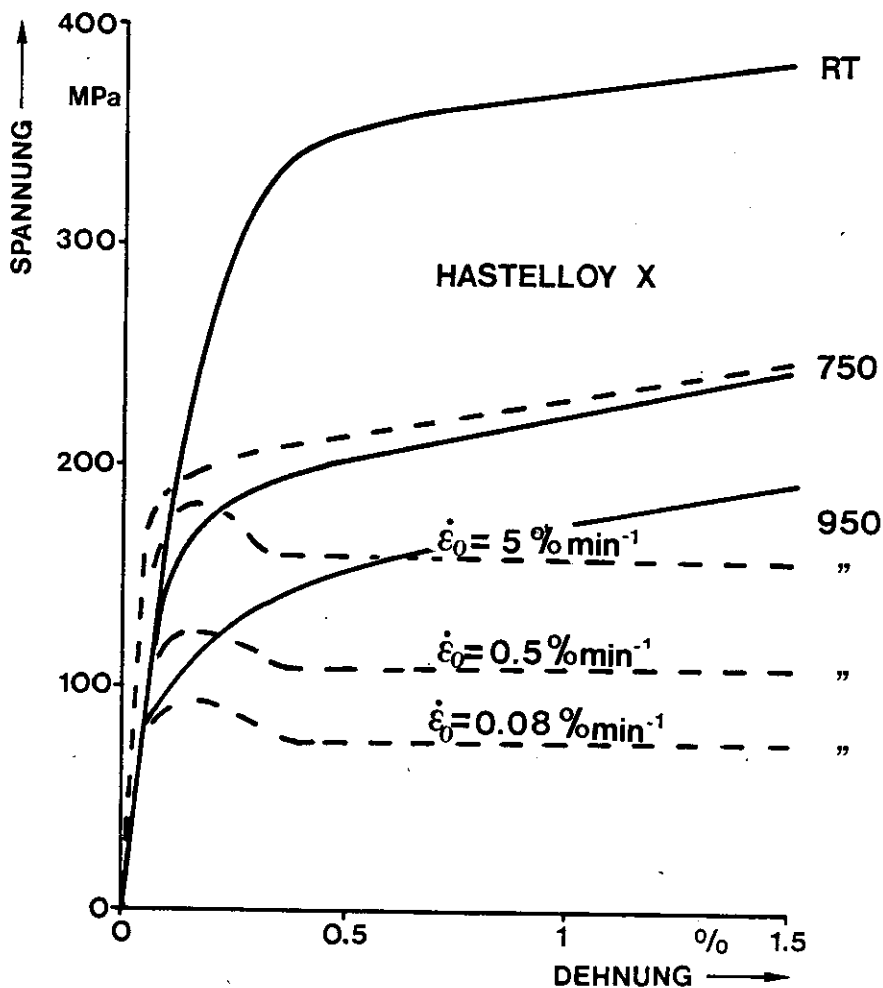


Abb. 3.12: Spannungs-Dehnungskurven des Werkstoffs Ni Cr 22 Fe 18 Mo (HASTELLOY X) bei spannungsgesteuertem (ausgezogene Kurven) und dehnungsgesteuertem (unterbrochene Kurven) Zugversuch.

Anhand einer einfachen mathematischen Überlegung läßt sich zeigen, daß das Spannungsplateau allein durch Kriechen bestimmt ist. Wird die Dehnrate  $\dot{\epsilon}_0$  der Probe in ihre elastischen, plastischen und Kriechanteile gemäß

$$\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon}_{el} + \dot{\epsilon}_{pl} + \dot{\epsilon}_{kr} \quad (3.4.1)$$

aufgeteilt, so gilt wegen der Zeitunabhängigkeit von  $\epsilon_{el}$  und  $\epsilon_{pl}$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{el} &\sim \dot{\sigma} \\ \dot{\epsilon}_{pl} &\sim \dot{\sigma} \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

Da aber auf dem Spannungsplateau  $\dot{\sigma} = 0$  ist, folgt

$$\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon}_{kr} \quad (3.4.3)$$

Mit dem Norton'schen Gesetz folgt dann für das Spannungsplateau

$$\sigma_p = E \left( \frac{\dot{\epsilon}_0}{k} \right)^{1/n} \quad (3.4.4).$$

Wie Abb. 3.12 zeigt, weisen die entsprechenden Kennwerte  $R_{p\ 0,2}$  und  $R_m$  der Kurzzeiteigenschaften die gleiche Dehnratenabhängigkeit auf. Erst wenn die Dehnrate  $\dot{\epsilon}_0$  so groß gewählt wird, daß tatsächliche plastische Verformung mit wachsender Verfestigung auftritt, kann eine zeitunabhängige  $R_{p\ 0,2}$ - und  $R_m$ -Grenze ermittelt werden.

Unter der Annahme, daß sich die tatsächliche Streckgrenze nur wenig mit der Temperatur ändert, ergibt sich aus der Abhängigkeit der Größen  $k$  und  $n$  von der Temperatur eine dehnratenabhängige Grenze zwischen plastischer Verformung und Kriechverformung, wie sie beispielhaft in Abb. 3.13 dargestellt ist. Der schraffierte Bereich deutet eine Zone an, in der sich Kriechen und Plastizieren überlagern.

Anders ist die Interpretation der Zugversuchsergebnisse bei konstanter Spannungsänderungsgeschwindigkeit. Da in diesem Fall die Spannung nicht durch Kriechen auf ein Plateau begrenzt bleibt, wird der Beginn plastischer Verformung stets bei den gleichen Spannungswerten erkennbar. Voraussetzung für die Durchführung eines

spannungsgesteuerten Zugversuchs bei sehr hohen Temperaturen sind Prüfmaschinen mit sehr hohen Abzugsgeschwindigkeiten, da mit zunehmender Spannung immer höhere Abzugsgeschwindigkeiten erforderlich sind, um den Spannungsabbau aufgrund der Kriechprozesse auszugleichen und eine konstante Spannungsänderungsgeschwindigkeit zu garantieren.

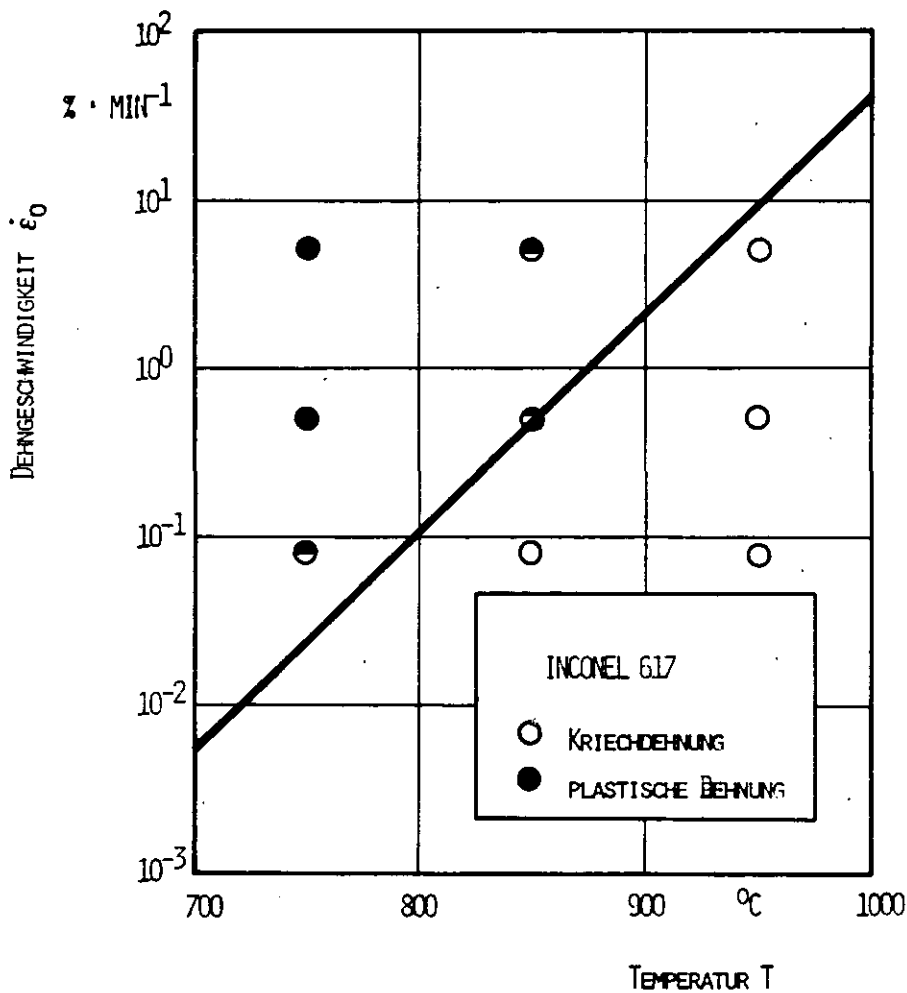


Abb. 3.13: Abgrenzung zwischen Kriechverformung und plastischer Verformung im Warmzugversuch am Beispiel des Werkstoffs Ni Cr 22 Co 12 Mo (INCONEL 617)



### 3.5 Strukturstabilität und Umgebungseinfluß

#### 3.5.1 Gefügeänderungen und deren Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften

Die bei hohen Temperaturen einzusetzenden Werkstoffe sind Vielstofflegierungen auf Nickel- oder Eisenbasis, die je nach thermomechanischer Vorbehandlung bei den angestrebten Betriebstemperaturen zur Bildung von Ausscheidungen, zumeist Karbiden, neigen. Schon nach kurzer Einsatzdauer unterliegen Art, Morphologie und Menge der Ausscheidungen einer Veränderung.

Die Gefügeänderungen und deren Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs sind Gegenstand von Auslagerungsversuchen. Dabei werden Werkstoffproben an Luft oder in betriebsrelevanten Medien geglüht (ausgelagert) und anschließend metallographisch und werkstoffmechanisch untersucht. Metallographische Untersuchungen dienen der Beobachtung von Gefügeveränderungen und mit den werkstoffmechanischen Untersuchungen (Zugversuch, Ermüdungsversuch, Kerbschlagbiegeversuch, etc.) wird eine Korrelation zwischen Belastungsdauer und mechanischen Eigenschaften angestrebt.

Der Einfluß der Strukturveränderungen durch langzeitiges Auslagern wird besonders deutlich bei den Kurzzeiteigenschaften und bei der Ermüdung. Abb. 3.14 zeigt den Einfluß der Auslagerung an Luft bei 600 - 950 °C auf die Bruchdehnung im Warmzugversuch für den Werkstoff INCONEL 617. Das obere Streuband zeigt Ergebnisse aus RT- und Warmzugversuchen an dem Werkstoff im lösungsgeglühten Anlieferungszustand. Nach einer Auslagerungsdauer von  $10^4$  h hat die Bruchdehnung im Zugversuch, besonders bei Raumtemperatur, deutlich abgenommen.

Zum Einfluß der Auslagerung auf das Ermüdungsverhalten liegen derzeit nur wenige Versuchsergebnisse vor. Die mit der Strukturänderung einhergehende verminderte Dehnungsfähigkeit des Werkstoffs läßt eine stärkere Verfestigung erwarten.

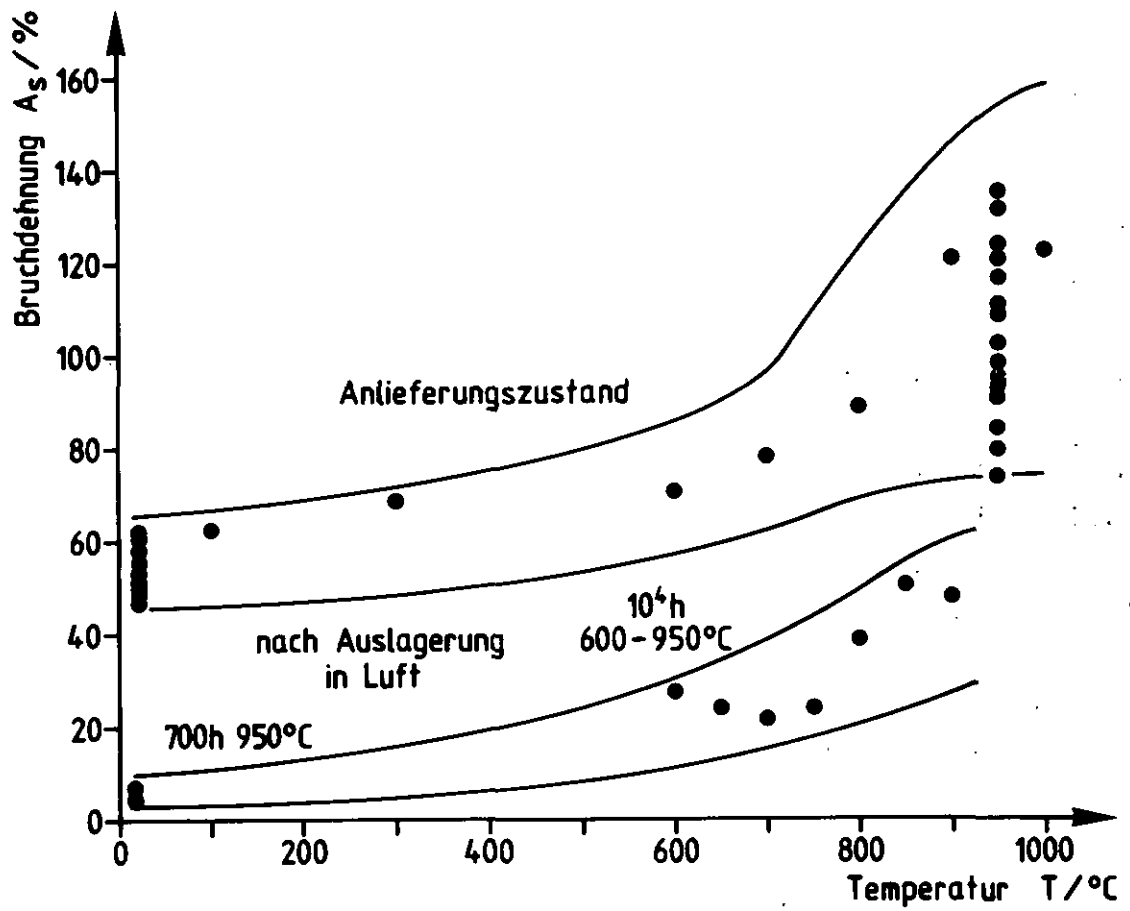


Abb. 3.14: Veränderung der Bruchdehnung im Zugversuch nach Auslagerung für den Werkstoff Ni Cr 22 Co 12 Mo.

Liegen die Auslagerungstemperaturen im Bereich der Rekristallisation, so ist auch eine Erhöhung der Zahl der ertragbaren Lastzyklen möglich.

### 3.5.2 Umgebungseinflüsse

Als Umgebungseinflüsse auf den Werkstoff gelten die Strahlenbelastung und die Wechselwirkung mit dem umgebenden Betriebsmedium. Während die Strahlenbelastung für die zu betrachtenden Komponenten vernachlässigbar klein ist, bewirken die Betriebsmedien, d.h. das Helium als Kühlmittel und das RSQ-Prozeßgas, eine Korrosion an der Werkstoffoberfläche.

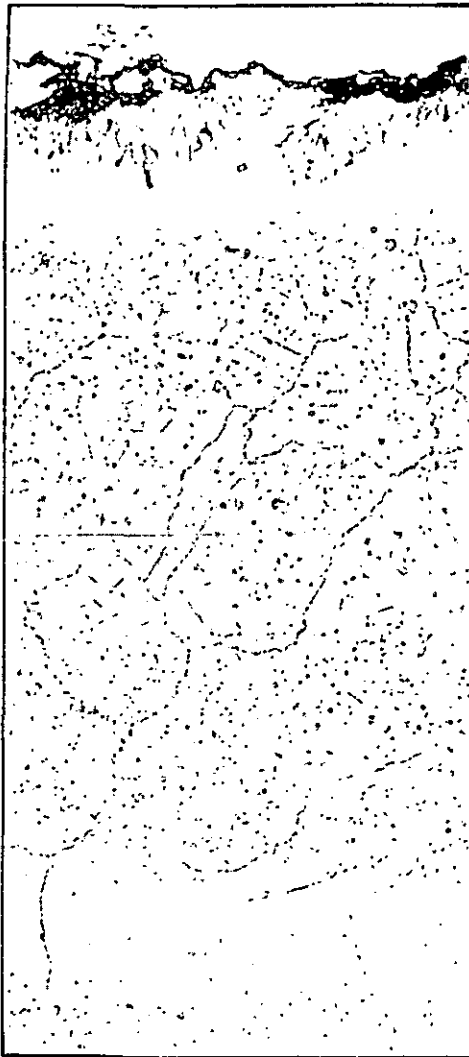
Das HTR-relevante Helium ist mit geringen Gehalten an  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  mit Partialdrücken im  $\mu\text{bar}$ -Bereich verunreinigt. Diese treten in Reaktion mit einzelnen Legierungselementen des Werkstoffs und bilden mit diesen unterschiedliche Reaktionsprodukte. Abhängig von der Temperatur, Gas- und Werkstoffzusammensetzung können Oxidation, Auf- und Entkohlung auftreten.

Bis zu Temperaturen um  $900^\circ\text{C}$  ist die Oberflächenreaktion in einem PNP-Standard-Testhelium<sup>1)</sup> für eine Auslegung nach bisher vorliegenden Ergebnissen ohne größere Bedeutung, da sich bei diesen Temperaturen stabile Chromoxidschichten bilden. Bei höheren Versuchstemperaturen kann je nach Gaszusammensetzung und Werkstoff sowohl starke Auf- als auch Entkohlung durch die Wechselwirkung von gelöstem Kohlenstoff in der Legierung mit den Produkten an der Oberfläche auftreten. Diese wird kontrolliert durch die Stabilität der Carbide in dem Grundwerkstoff und durch das Oxidations- und Kohlenstoffpotential in der Gasatmosphäre.

Oberhalb etwa  $950^\circ\text{C}$  hängt die schützende Wirkung der Schicht vom Co- und Feuchtegehalt des Heliums ab. Bei niedrigen Co-Gehalten kommt es zu schneller Aufkohlung (niedriger Wassergehalt) oder schneller Entkohlung (nomineller oder höherer Wassergehalt). Bei ausreichend hohen Co-Werten tritt durch die Barrierenwirkung der Oxidschicht nur eine langsame Aufkohlung auf, die tolerierbar ist.

---

<sup>1)</sup> Zusammensetzung der Verunreinigungen in Helium:  
 $500/1,5/15/20 \mu\text{bar H}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CO}/\text{CH}_4$



poröse Oxidschicht an der Oberfläche

innere Oxidation an Korngrenzen

karbidfreie Zone durch Chromverarmung

Karbidbildung durch eindiffundierten Kohlenstoff

unveränderter Werkstoff

Abb. 3.15: Korrosionserscheinungen in HTR-Helium, dargestellt in einem metallographischen Schliff senkrecht zur korrodierten Oberfläche des Werkstoffs Ni Cr 22 Co 12 Mo, der bei 850°C 1500 h in besonders stark aufkohlendem HTR-Helium ausgelagert wurde.

Der metallographische Schliff in Abb. 3.15 zeigt Korrosion, die durch eine stark aufkohlende Zusammensetzung des HTR-Heliums hervorgerufen wurde. Die oberflächennahen Gebiete zeigen eine poröse Oxidschicht, darunter innere Oxidation, vorwiegend von Aluminium, dann eine chromverarmte Zone, die keine Ausscheidungen zeigt, und eine Zone verstärkter Carbidbildung über dem Bereich des unbeeinflussten Materials.

Ähnlich wie bei Strukturänderungen zeigen Korrosionserscheinungen einen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs. Während bei Raumtemperatur sich die Kurzzeiteigenschaften stark verändern, wurden bei hohen Temperaturen bei Kriechen und Ermüden

keine nachteiligen Einflüsse der Korrosion in HTR-Helium festgestellt, solange die Korrosion sich auf eine Oxidschichtbildung und nur schwacher Aufkohlung beschränkt. Diese Korrosionseffekte führen zu keiner signifikanten Änderung der Zeitstandkennwerte, wie aus den uns vorliegenden Versuchsergebnissen bis zu 25.000 Stunden (Abb. 3.3) zu entnehmen ist. Bei LCF-Versuchen ergeben sich bei Versuchen in HTR-Helium im Bereich kleiner Dehnschwingbreiten größere Bruchlastspielzahlen als in Luft, was Abb. 3.7 deutlich macht.

Fazit:

Es werden grundsätzlich die Reaktion des Werkstoffs auf stationäre und zyklische mechanische sowie thermische und umgebungsbedingte Belastungen beschrieben. Darüber hinaus werden die eingeführten Verfahren zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte für die Auslegung und die für eine inelastische Analyse notwendigen Stoffgesetze dargestellt. Im Hochtemperaturbereich sind alle Werkstoffeigenschaften zeitabhängig, und das Verformungsverhalten als Antwort auf mechanische Belastungen ist durch Kriechvorgänge bestimmt. Damit werden sowohl Kurzzeitkennwerte als auch Ermüdungskennwerte mit steigender Temperatur zunehmend dehnratenabhängig.

Die Korrosionseinflüsse im Primärkreis-Helium lassen sich, bei technisch realisierbarer Kontrolle der Zusammensetzung der Verunreinigungen, auf geringe Effekte beschränken, die tolerierbar sind.

Dokumentationen zu Kapitel 3:

- Erörterung der Anwendung verschiedener Kriechgesetze auf das Zeitstandverhalten am Beispiel von INCONEL 617 KFA;  
Penkalla
- Grundlagen der Invariantentheorie zur Berechnung des Bauteilverhaltens unter Kriechbeanspruchung KFA;  
Penkalla
- Verformungskurven im Hochtemperaturbereich KFA;  
Over,  
Penkalla
- Diskussion der für die Durchführung inelastischer Analysen angewandten und benötigten Stoffgesetze IA;  
Seehafer
- Berücksichtigung des Einflusses der Korrosion auf die mechanischen Eigenschaften von Hochtemperaturlegierungen bei der Auslegung von HTR-Komponenten KFA;  
Schuster
- Versuche an bauteilrelevanten Proben im IRW als Grundlage für ein HTR-Regelwerk KFA;  
Rödig, Over  
Penkalla  
Schubert  
Nickel
- Werkstoffverhalten unter komplexer Beanspruchung HRB; GHT/IA;  
BBC; KFA;  
Bodmann  
Breuer  
Raule  
Rödig
- Zeitstand- und Behälterversuche an rohrförmigen Bauteilen mit für den Hochtemperaturreaktor relevanten Abmessungen im Temperaturbereich 850 °C bis 1020 °C MPA

Literatur zu Kapitel 3:

- /1/ R. Schaar:  
Archiv Eisenhüttenwesen 28 (1957), H 3
- /2/ P. G. McVetty:  
Mechan. Eng. 56 (1934), S. 149
- /3/ R. L. Coble:  
J. Appl. Physics 34 (1963), S. 1679
- /4/ F. R. N. Nabarro:  
Conf. Proc. "Strength of Solids", The Physical Soc.,  
Bristol (1948), S. 75
- /5/ C. Herring:  
J. Appl. Physics 21 (1950), S. 437
- /6/ W. Blum:  
Z. Metallkunde 68 (1977), S. 484
- /7/ B. Ilchner:  
"Hochtemperatur-Plastizität", Springer-Verlag, Berlin  
(1973)
- /8/ F. H. Norton:  
"Creep of Steel at High Temperature", McGraw Hill, New York  
(1929)
- /9/ L. Prandtl:  
ZAMM 8 (1928), S. 85
- /10/ C. R. Soderberg:  
Trans. ASME 58 (1936), S. 739
- /11/ R. v. Mises:  
"Mechanik der festen und flüssigen Körper im plastisch  
deformablen Zustand", Königl. Ges. d. Wiss., Göttingen  
(1913)



- /12/ F. C. Monkman, N. J. Grant:  
Proc. ASTM 56 (1956), S. 593
- /13/ F. Dobes, K. Milička:  
Metal Science 10 (1976), S. 382
- /14/ F. K. G. Odqvist, J. Hult:  
"Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe", Springer-Verlag, Berlin (1962)
- /15/ H. W. Shen, Q. G. Cai:  
Superalloys 1980, S. 615
- /16/ L. M. Kachanov:  
"Theorie des Kriechens" (russ.), Gos. Izdat. Fis. Mat. Lit. Moskau (1960)
- /17/ A. Plumtree, B. P. Fim, M. J. Douglas:  
Conf. Proc.: "Eng. aspects of Creep", Sheffield (1980),  
Inst. Mech. Eng., V. 1, S. 103
- /18/ W. Blum, F. Pschenitzka:  
Z. Metallkunde 67 (1976) H1, S. 62
- /19/ F. K. G. Odqvist:  
"Mathematical Theory of Creep and Creep Rupture", Oxford  
Math. Monographs (1965)
- /20/ F. P. J. Rimrott:  
Journ. Appl. Mech., 26, S. 271 - 275 (1959)
- /21/ S. A. Patel, B. Venkatraman:  
IUTAM-Coll. on Creep in Structures, Stanford, Proc. im  
Springer-Verlag, Berlin (1962)
- /22/ S. A. Patel, J. Kempner, et. al.:  
Nat. Adv. Com. Aeronautics, RM 56, C20 (1956)
- /23/ J. Miller:  
ASTM Spec. Techn. Publ. 165 (1954)

- /24/ V. N. Vagliente, J. Mayers, N. J. Hoff:  
Conf. Eng. Aspects of Creep, Vol. 2, Sheffield (1980)
- /25/ L. Prandtl:  
ZAMM 8, S. 85 - 106 (1928)
- /26/ A. Naday:  
"The Influence of Time upon Creep", McGraw Hill, New York (1938)
- /27/ L. F. Coffin:  
"A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal", Trans. ASME (Series A), 76, 931 - 950 (1954)
- /28/ L. F. Coffin, "Low Cycle Fatigue: a Review"  
Appl. Mater. Res. 1, 129 - 141 (1962)
- /29/ P. G. Forrest:  
"The use of strain cycling tests for assessing thermal fatigue resistance", Appl. Mater. Res. 4, 239 - 246 (1965)
- /30/ M. Klesnil, P. Lukas:  
"Fatigue of metallic materials", Material Science Monographs 7, Amsterdam, Elsevier (1980)
- /31/ K. Kuwabara, A. Nitta:  
"Estimation of thermal fatigue damage on steam turbine rotors", CRIEPI Report No. E277001, Tokyo, pp. 1-23, (1977)
- /32/ M. Briner, V. Beglinger:  
"Thermal fatigue analysis for a large gas turbine rotor", Conf. Creep and Fatigue in Elevated Temperature Applications, London, Inst. Mech. Engrs., pp. 220.1 - 220.8
- /33/ D. S. Wood, J. Wynn, A. B. Baldwin, P. O'Riordan:  
"Some creep/fatigue properties of type 316 steel at 625°C", Fatigue Eng. Mater. Struct. 3, 39 - 57 (1980)

/34/ R. P. Skelton:

"The effect of microstructure and tensile dwell on the growth of short fatigue cracks in 316 steel at 625 °C", Int. Conf. Mechanical (1981)

/35/ J. W. Ostergren:

"A damage function and associated failure equations for predicting hold time and frequency effects in elevated temperature, low cycle fatigue", J. Testing Eval. 4, 327-339, (1976)

/36/ H. Kirchhöfer, J. Rottmann, F. Schubert, H. Nickel:

"Untersuchungen zum Isothermen-Ausscheidungsverhalten von Nickelbasislegierungen mit Hilfe der elektro-chemischen Phasenisolierung"; Jül.-Bericht Nr. 1903, März 1984 - derzeit noch in Druck -  
(Bericht anl. Dissertation v. H. Kirchhöfer, RWTH-Aachen, 1983)

/37/ H. Kirchhöfer, F. Schubert, H. Nickel:

"Precipitation Behaviour of NiCr 22 Fe 18 Mo (HASTELLOY X) and NiCr 22 Co 12 Mo (INCONEL 617) after isothermal ageing" - to be published in Nuclear Technology (1984)

/38/ H. W. Grünling, B. Ilschner, S. Leistikow, A. Rahmel, M. Schmidt:

"Wechselwirkung zwischen Kriechverformung und Heißgaskorrosion", Werkstoffe und Korrosion 29, (1978), 691

/39/ V. Guttman, J. B. Mariott:

"The Effects of Corrosive Atmospheres on Time Dependent Mechanical Properties", Environmental Degradation of High Temperature Materials, Series 3, Nr. 13, Vol 1 (March 1980)

/40/ D. F. Lupton:

"Mechanisms of Surface Scale Formation in HTR-Helium", Jül-Bericht 1639 (Jan. 1980)

- /42/ P. J. Ennis, H. Schuster:  
 "The Mechanical Properties of Alloys in High Temperature Reactor Environments", Symposium: "The Interaction Between Corrosion and Mechanical Stress at High Temperatures", JRC Petten (13. - 14.05.1980)
  
- /42/ G. Wahl, F. Schmaderer:  
 "Protection against Carburization in High Temperature Reactors", Proceedings of the III. European Conf. on Chemical Vapor Deposition, Neuchatel/CH (16. - 18.04.1980)
  
- /43/ C. J. Bolton, I. R. McLaughlin:  
 "Creep of 9 Cr - 1 Mo Steel in a Carburizing Environment" (wie /41/)
  
- /44/ R. Hales, C. B. Bolton:  
 "Diffusion Accompanied by Chemical Reaction of the Diffusing Species", Central Electricity Generating Board-Report RD/B/N 4794 (May 1980)
  
- /45/ H. Walther:  
 "On The Fracture Development of Experimental and Theoretical Techniques in the Dragon Project Metals Programme at CRL", FIAT, D. P. Report 935 (July 1975)
  
- /46/ J. Ebberink, K. Krompholz, E. teHeesen:  
 "Corrosion Behaviour of INCOLOY 802 Creep Rupture Specimens during Exposure in Air and Helium Environment of 1073 K to 1273 K", (wie 41)
  
- /47/ H. J. Penkalla, V. Guttman, J. Timm:  
 "Interaction between Mechanical Stress and Gaseous Carburization at High Temperatures", Proc. of the European Symposium "Corrosion and Mechanical Stress at High Temperature", Petten, NL, p. 389 (1980)

#### 4. Übertragbarkeit vorhandener Regeln

##### 4.1 Besonderheiten im Hochtemperaturbereich

Der Nachweis der sicheren Lastabtragung von Komponenten, die im Hochtemperaturbereich (HT-Bereich) eingesetzt werden, wird durch das zeitabhängige Werkstoffverhalten erschwert (s. Kap. 3 und 7). Die Auslegung im HT-Bereich muß deshalb unter Beachtung des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens sowie des Anwachsens bleibender Dehnungen erfolgen. Zudem ergeben sich infolge thermisch bedingter Gefügeänderungen und Reaktionen mit dem Betriebsmedium im oberflächennahen Bereich je nach Werkstoffart unterschiedlich hohe obere Einsatztemperaturgrenzen. Dadurch ist der Einsatz konventioneller, warmfester Stähle im angesprochenen Temperaturbereich nicht möglich.

Inwieweit vorhandene Regeln für die Anwendung im HT-Bereich geeignet erscheinen, wird in den folgenden Abschnitten dargestellt. Schwerpunktmäßig wird auf folgende Regelwerke<sup>+)</sup>  Bezug genommen:

- AD-Merkblätter
- TRD-Bestimmungen
- KTA-Regeln
- ASME-Code

##### 4.2 Regeln für Werkstoffe und Erzeugnisformen

AD-Merkblätter und TRD-Bestimmungen enthalten Regeln für die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen, die sich beim Bau konventioneller Druckbehälter und Kraftwerksanlagen bewährt haben. Die hiernach zulässigen Werkstoffe, deren Werkstoffdaten in DIN-Normen, SEW- und VdTÜV-Werkstoffblättern aufgelistet sind, gelten aufgrund ihrer betrieblichen Bewährung als begutachtet. Diese Werkstoffe können bis zu den Temperaturgrenzen eingesetzt werden, für die Werkstoffdaten angegeben sind. Sofern auch Zeitstanddaten vorliegen, ist der Einsatz der Werkstoffe im zeitabhängigen Temperaturbereich zulässig.

<sup>+)</sup>  Die Abkürzungen werden im Literaturverzeichnis erläutert.

Beispielsweise enthält die DIN 17175 (Nahtlose Rohre aus warmfesten Stählen) 1%-Zeitdehngrenzwerte für 10 000 und 100 000 Stunden und Zeitstandfestigkeiten für 10 000, 100 000 und 200 000 Stunden bis jeweils 550 °C. Das VdTÜV-Werkstoffblatt für die Eisenbasislegierung X 10 NiCrAlTi 32 20 weist Zeitstandfestigkeiten von 10 000, 50 000 und 100 000 Stunden bis jeweils 900 °C auf. Dieser Werkstoff ist jedoch noch nicht in der Liste der nach TRD und AD zulässigen Werkstoffe aufgeführt.

Regeln und Richtlinien für Leichtwasserreaktoren wie die KTA 3201.1, die auf den ASME-Code, Section III, aufbaut, und die Leitlinien der Reaktorsicherheitskommission nehmen lediglich Bezug auf Werkstoffdaten für den zeitunabhängigen Temperaturbereich, nämlich bis 400 °C.

Höhere Anwendungstemperaturen bis etwa 800 °C läßt der ASME-Code, Case N 47 zu. Für die amerikanischen Stähle (AISI 304, AISI 316, 2 1/4 Cr- 1 Mo und Alloy 800 H, die zu folgenden deutschen Stählen artgleich sind, nämlich den beiden austenitischen Stählen X 5 CrNi 18 9 und X 5 CrNiMo 18 10, dem ferritischen Stahl 10 CrMo 9 10 und der Eisenbasislegierung X 10 NiCrAlTi 32 20, enthält der ASME-CC N 47 mechanische und physikalische Werkstoffdaten für die Berechnung sowie die Bewertung der Beanspruchungen.

In anderen Anwendungsbereichen wie Turbinenbau und chemische Industrie gibt es Werkstoffe, die bei Temperaturen oberhalb 800 °C eingesetzt werden. Für diese Werkstoffe liegen entsprechende Werkstoffdaten und Herstellungsspezifikationen vor. Diese können jedoch nur eingeschränkt übernommen werden, da entweder Werkstoffe vorliegen, aus denen keine wärmetauschenden Komponenten hergestellt werden können, oder der Erfahrungshintergrund und die Herstellerangaben zum Werkstoffverhalten limitiert sind. Insbesondere fehlen die benötigten Kennwerte für die geplanten langen Einsatzzeiten sowie Angaben über die Werkstoffreaktion auf thermisch induzierte Dehn- bzw. Spannungswechsel und Angaben über die mögliche Werkstoffreaktion auf die geringen Verunreinigungen des HTR-Heliums.

Die in diesem Kapitel genannten Regeln und Spezifikationen für Werkstoffe und Erzeugnisformen liefern eine Richtschnur für den Umfang und die Absicherung der erforderlichen Werkstoffdaten. Auf dieser Basis werden im Kapitel 6.6 Vorstellungen entwickelt über die erforderlichen Daten für eine Begutachtung und nachfolgende Zulassung der Werkstoffe für HTR-Anlagen.

#### 4.3 Regeln für die Festigkeitsauslegung

AD-Merkblätter und TRD-Bestimmungen sowie die KTA-Regel 3201.2 enthalten komponentenspezifische Hinweise für die Bemessung gegen Primärspannungen. Eine Beurteilung der Bauteile gegen Ermüdung bei zeitabhängiger Beanspruchung erfolgt unterschiedlich detailliert. Das genaueste Verfahren kommt in der KTA-Regel zur Anwendung. Für Bauteile, die im HT-Bereich betrieben werden, enthalten die Regelwerke für nicht-nukleare Anlagen zusätzlich Verfahren zur Abschätzung der Überlagerung von Ermüdungs- und Kriecherschöpfung.

Die weiteren hochtemperaturspezifischen Versagensarten werden lediglich im ASME-CC N 47 diskutiert.

Der ASME-CC N 47 wurde in USA bei der Auslegung von Komponenten der Schnellen Brutreaktoren mit Betriebstemperaturen von etwa 550 °C und der Hochtemperaturreaktoren bis 750 °C verwendet. Dabei umfaßt die festigkeitsmäßige Auslegung Primärspannungsnachweise sowie Lastwechselbeurteilungen, wobei vorgegebene Dehngrenzen einzuhalten sind. Desweiteren sind Stabilitätsnachweise zu führen, wenn die Bauteilbelastungen zu Beulen oder Kriechbeulen führen können.

Ein Regelwerk für die festigkeitsmäßige Auslegung der Bauteile von Hochtemperaturreaktoren (HTR), bei denen die gleichen Versagensarten auftreten können, wird sich deshalb am ASME-CC N 47 orientieren müssen. Dementsprechend sind die erforderlichen Werkstoffdaten bereitzustellen. Es können sich besondere Anforderungen hinsichtlich der Sicherheitsabstände gegen Beanspruchung, Belastung und Zeit ergeben. So werden für die Beurteilung

der Beanspruchungen für die verschiedenen Strukturwerkstoffe der HTR-Komponenten im vorgesehenen Anwendungstemperaturbereich folgende Werkstoffdaten benötigt:

- für physikalische Eigenschaften
- zur Begrenzung der Primärspannungen
- zur Begrenzung der Belastungswechsel
- zur Durchführung inelastischer Analysen

Neben der Bereitstellung der Daten für die jeweiligen Anwendungstemperaturen waren im Hinblick auf die Übertragung der besprochenen Regeln unter anderem folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Welche Stoffgesetze sind zur Durchführung inelastischer Analysen geeignet?
- Welchen Einfluß haben Dehngeschwindigkeiten auf die Kurzzeitkennwerte des Werkstoffs?
- Welchen Einfluß haben Dehngeschwindigkeit und Haltezeit auf die Festigkeitseigenschaften unter zyklischer Belastung?
- Sind die angegebenen Sicherheitsabstände gegen die verschiedenen Spannungsgrößen auch geeignet zur Festlegung der Spannungsvergleichswerte von HTR-Komponenten?
- Sind die angegebenen Sicherheitsabstände gegen die Dehnschwingbreite bzw. die Lastspielzahl auch geeignet zur Festlegung der Auslegungsermüdungskurven von HTR-Komponenten?
- Welche Bedeutung hat das Dehngrenzenkriterium? Sind die im ASME-Code, Case N 47 angegebenen Werte angemessen?
- In welcher Form sind Kriech- und Ermüdungsschädigung zu ermitteln und kumulativ zu bewerten?
- Kann auf eine detaillierte Analyse der Schweißverbindungen verzichtet werden?

Vorläufige Antworten zu den angesprochenen Fragestellungen enthalten die Kapitel 8, 9 und 10.



#### 4.4 Regeln für Fertigung und Montage

Sowohl die TRD-Bestimmungen und AD-Merkblätter für konventionelle Anlagen als auch die KTA-Regel 3201.3 und die Leitlinien der Reaktorsicherheitskommission für Druckwasserreaktoren enthalten Anforderungen an die Fertigung, Montage und Prüfung von Komponenten und beschreiben Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Analog zum ASME-CC N 47 für die Festigkeitsauslegung sind im höheren Temperaturbereich für die Fertigung und Montage folgende Code-Cases vorhanden:

- ASME-CC N-48, "Fabrication and Installation of Elevated Temperature Components",
- ASME-CC N-49, "Examination of Elevated Temperature Nuclear Components"
- ASME-CC N-50, "Testing of Elevated Temperature Components"

Vor Übertragbarkeit dieser Regeln auf den Hochtemperaturbereich sind folgende Fragestellungen zu klären:

- Welche Fertigungsverfahren müssen bei der Verarbeitung der HTR-Werkstoffe berücksichtigt werden?
- Sind die bekannten zerstörungsfreien Prüfverfahren für die HTR-Werkstoffe geeignet?

Der gegenwärtige Stand der Arbeiten ist in Kapitel 12 wiedergegeben.

#### 4.5 Regeln für wiederkehrende Prüfungen

Sowohl die Regeln für nicht-nukleare Anlagen als Bestandteil der Dampfkessel- und Druckbehälterverordnung als auch die Regeln für Leichtwasserreaktoren (KTA 3201.4 und ASME-Code, Section XI) enthalten Anforderungen für die wiederkehrenden Prüfungen als Teil der betrieblichen Überwachung. Sie dienen der Information über die Integrität einer Komponente.

Diese Regeln setzen voraus, daß die Komponenten zugänglich und prüfbar sind und enthalten Angaben über Umfang und Zeitpunkt durchzuführender Prüfungen.

Der sicherheitstechnische Stellenwert der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen und Ersatzmaßnahmen für HTR-Komponenten wird in den Kapiteln 6 und 11 behandelt.

Fazit:

Nach Prüfung der Aussagen vorhandener Regelwerke und Rahmenrichtlinien zeigt sich, daß die Auslegungsphilosophie des Niedertemperaturbereiches auf Komponenten mit Arbeitstemperaturen oberhalb 800 °C nicht übernommen werden kann. Für die Auslegung mit zeitabhängigen Werkstoffkennwerten existiert derzeit nur der amerikanische Regelwerkentwurf ASME-CC, N 47, der jedoch nur bis etwa 800 °C Regeln angibt und auf höhere Temperaturen nicht extrapolierbar ist. Daher müssen die Grundlagen von HTR-Regeln für Werkstoffe, Konstruktionen, Auslegung und Beurteilung des Betriebsverhaltens von Komponenten, die dem zeitabhängigen Werkstoffverhalten Rechnung tragen und einem HTR-spezifischen sicherheitstechnischen Konzept angepaßt sind, im Rahmen eines HTR-Regelwerkes weitgehend neu gestaltet werden.

Dokumentationen zu Kapitel 4:

- Vergleich der Aussagen über Werkstoffe, Werkstoffverhalten und Werkstoffversagen verschiedener deutscher und amerikanischer Regelwerke hinsichtlich deren Anwendungsmöglichkeiten für den Werkstoffeinsatz bei Temperaturen oberhalb 800 °C KFA; Over
- Regelwerk für die Festigkeitsauslegung GRS; Bieniussa, KFA; Over
- Aussagen vorhandener Regelwerke zu
  - Herstellung und Konstruktion RWTÜV; Just
  - Prüfung bei der Herstellung

Literatur zu Kapitel 4:

- /1/ Statusbericht, Reaktordruckbehälter, Band 1, Institut für Reaktorsicherheit, Dez. 1973
- /2/ H. H. Oude-Hengel,  
Rohrleitungen in Kraftwerken, Verlag TÜV-Rheinland,  
Köln 1978

Regelwerke

AD-Merkblätter = Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter  
 TRD-Bestimmungen = Iechnische Regeln für Dampfkessel  
 KTA-Regeln = Kerntechnische Anlagen  
 ASME-Code = The American Society of Mechanical Engineers  
 DIN-Normen = Deutsche Industrie Normen  
 SEW-Werkstoffblätter = Stahl-Eisen-Werkstoffblätter  
 VdTÜV-Werkstoffblätter = Vereinigung der Iechnischen Überwachungsvereine

## 5. THTR-300-Erfahrungen

### 5.1 Der Dampferzeuger als repräsentative Komponente

Im Zuge der Auslegung des THTR-Dampferzeugers (DE) mußte ein großer Teil der Themen behandelt werden, deren grundsätzliche Behandlung für den wesentlich höheren Einsatztemperaturbereich der wärmetauschenden Komponenten der Prozeßwärmanlage vom Fachkreis zu erarbeiten war.

Daher wurde in den Einzeldiskussionen auf die Erfahrungen bei der Auslegung und Herstellung der THTR-DE zurückgegriffen; die folgenden Ausführungen fassen die Einzelbeiträge zusammen.

Der Dampferzeuger ist nach dem Zwangsdurchlauf-System konzipiert. Die Heizflächen bestehen aus Helix-Rohren, d.h. schraubenförmig, rechts- bzw. linksgängig, gebogenen Rohren. Die Rohre sind in konzentrischen, mehrgängig gewickelten Rohrzylindern angeordnet. Das Primärgas strömt von unten nach oben zuerst über die im Gleichstrom geschaltete Zwischenüberhitzer- und anschließend über die im Gegenstrom geschaltete Hochdruck-Heizfläche.

Außerhalb des in den Spannbetonreaktordruckbehälter integrierten Teiles des DE werden die Systemleitungen an den Sammlern (Speisewasser-, KZÜ-, HZÜ-, Frischdampf-) zusammengeführt.

Die Hauptauslegungsdaten des DE sind:

thermische Leistung je DE	128 MW
Heliumtemperatur Dampferzeugereintritt	750 °C
Heliumtemperatur Dampferzeugeraustritt	250 °C
Heliumdruck vor Dampferzeuger	$p_a = 38,5$ bar
Druckverlust (Gasseite)	0,4 bar

Frischdampf	550 °C, $p_a = 187$ bar
Zwischenüberhitzer: Eintritt	365 °C, $p_a = 55$ bar
Zwischenüberhitzer: Austritt	535 °C, $p_a = 49$ bar

## 5.2 Werkstoffe und Erzeugnisformen

Die Wahl der Werkstoffe für die druckführenden Teile der Dampferzeuger erfolgte unter Berücksichtigung der o.g. Betriebsbedingungen sowie der technischen Erfahrungen im Kraftwerksbau.

Für Temperaturen bis zu 375 °C wird der warmfeste Stahl 15 Mo 3 verwendet, bis zu 520 °C der Stahl 10 CrMo 9 10 und bis zu 620 °C die Eisenbasislegierung X 10 NiCrAlTi 32 20.

Für Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C kommt von diesen Werkstoffen nur X 10 NiCrAlTi 32 20 in Frage, auf den sich die folgenden Ausführungen beschränken.

Die Grundanforderungen an diesen Werkstoff waren nach VdTÜV-Werkstoffblatt zu erfüllen, darüberhinaus wurden folgende Analyseneinschränkungen festgelegt:

C	0,035	...	0,06 %	(Mittelwert 0,045 %)
Ni	32,5	...	35,0 %	
Cr	21,0	...	23,0 %	
P	0,015 %			
Ti	0,15	...	0,40 %	(Mittelwert 0,30 %)
Al	0,15	...	0,40 %	(Mittelwert 0,20 %)
Ti + Al	< 0,6 %			
S	< 0,015 %			
N <sub>2</sub>	< 0,030 %			

Für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C ist jedoch die Variante INCOLOY 800 H mit C > 0,06 % vorzusehen, was auch bei den Ti- und Al-Gehalten zu berücksichtigen ist.

Die Verwendung der Werkstoffe für die THTR-DE erfolgte aufgrund von Einzelzulassung.

Der Nachweis der Güteeigenschaften sowie die Prüfungen an Erzeugnisformen erfolgte anhand von Technischen Prüf- und Abnahmebedingungen (TPAB). Grundlage für die TPAB's waren die Anforderungen in der Dampfkesselverordnung, Technische Regeln für Dampfkessel (TRD), VdTÜV-Werkstoffblatt und DIN-Normen. Der Werkstoff X 10 NiCrAlTi 32 20 kommt in den Erzeugnisformen Blech, Formstahl, nahtloses Rohr und Schmiedestück zum Einsatz.

### 5.3 Festigkeitsauslegung und Lebensdauerbeurteilung

Die Festigkeitsanalysen der DE im THTR wurden in drei Schritten durchgeführt:

- Dimensionierung der drucktragenden Bauteile
- Festigkeitsauslegung der Bauteile gegen die in Betrieb und Störfall auftretenden Primär- und Sekundärspannungen
- Lebensdauerbeurteilung, d. h. Kriech- und Ermüdungsanalyse der zyklisch beanspruchten DE-Komponenten.

Zum Zeitpunkt der Planungsarbeiten am THTR lag für die einzelnen Berechnungsschritte ein geschlossenes Regelwerk nicht vor. Der Nachweisumfang sowie die Beurteilung und Absicherung der berechneten Beanspruchungen wurden deshalb im Rahmen der Genehmigung durch spezielle von den Gutachtern geprüfte Berechnungsspezifikationen geregelt.

Die Grundsätze des in den USA parallel entwickelten Hochtemperatur-Regelwerkes mit der heutigen Bezeichnung ASME-CC N 47 sind in diese Spezifikationen eingeflossen. Zu Beginn der THTR-Planung war eine Auslegung nach TRD vorgesehen, während in den USA (z. B. für die DE des Fort St. Vrain-Reaktor) die damalige Regel ASME Code, Case 1331-4 zur Anwendung kam. Die Weiterentwicklung über den ASME Code, Case 1592 bis zum heutigen ASME-CC N 47 fiel zeitlich zusammen mit der Dimensionierung und der vertieften konstruktiven und rechnerischen Bearbeitung der THTR-DE.

Die durch die Mitberücksichtigung der neuentwickelten amerikanischen Auslegungsregeln entstandenen Nachweisprobleme wurden durch zweierlei Maßnahmen gelöst:

- a) Es wurden Detailüberlegungen und -untersuchungen durchgeführt, um einige in den Regelwerken ASME-CC 1592/CC N 47 vorhandene, zu große Konservativitäten in der Festlegung von Spannungs- und Dehnungsgrenzwerten sowie im Verfahren zur elastischen Bestimmung der Beanspruchungen zu reduzieren.
- b) Es mußten geplante transiente Betriebsvorgänge mit dem Ziel verändert werden, die zeitliche Änderung der Temperatur der Medien und damit die Komponentenbelastung durch instationäre Temperturfelder zu vermindern.

Die folgenden Abschnitte geben einen Abriß der Dimensionierung und der Festigkeitsnachweise der DE-Komponenten wieder.

#### 5.3.1 Dimensionierung der drucktragenden Bauteile

Die Dimensionierung dient der Festlegung der wesentlichen Abmessungen der druckführenden Bauteile. Als Belastungen werden bei den DE-Komponenten die Beanspruchungen im stationären Betrieb unter Berücksichtigung von Zuschlägen herangezogen.

Die Sicherung der Lebensdauer eines Bauteils wurde in der Dimensionierungsphase durch die Einführung der Zeitstandfestigkeit für Materialien im Kriechbereich erreicht. Die Dimensionierung erfolgte nach den Regeln der TRD und AD, wobei zusätzlich noch die bleibende Dehnung nach 30 Betriebsjahren auf kleiner 1 % begrenzt wurde.



### 5.3.2 Begrenzung von Primär- und Sekundärspannungen

Die Beurteilung der auftretenden Primär- und Sekundärspannungen bzw. deren Überlagerungen erfolgte nach einer auf der Basis des ASME-Codes Section III und für Hochtemperaturkomponenten des ASME-CC N 47 aufbauenden Unterlage. Bei der THTR-Auslegung wurden die auftretenden Belastungsfälle des DE in die zwei Kategorien Betriebsfälle und Notfälle eingeteilt. Zu den Betriebsfällen zählen der Normalbetrieb, der gestörte Betrieb sowie die Auslegungsstörfälle. Bezüglich der Begrenzung der Primär- und Sekundärspannungen wurden für die Betriebsfallkategorie "a" die Grenzwerte aus Test 2 des ASME-CC N 47 geringfügig modifiziert. Außerdem wurde der Test 3 angewandt.

### 5.3.3 Kriech- und Ermüdungsanalyse

Die Beurteilung der Kriech- und Ermüdungsschädigung erfolgte in der Regel mit einem auf der Basis von TRD 301 modifizierten Nachweisverfahren. Die Unterschiede bestanden im wesentlichen in einer weiteren Detaillierung der mit elastischen Berechnungen ermittelten maßgeblichen Spannungsschwingbreiten an Stellen mit Spannungskonzentrationen.

Es wurden unterschiedliche Berechnungsverfahren für die folgenden drei Bereiche entwickelt:

- die Struktur befindet sich im elastischen Bereich (Bereich A)
- die Spitzenspannung ist im überelastischen Bereich; die Nennspannung bleibt elastisch (Bereich B)
- sowohl Spitzenspannung als auch Nennspannung befinden sich im überelastischen Bereich.

An einer Komponente, die aufgrund von Abschätzungen und elastischen Methoden als bezüglich Kriech-Ermüdung hochbelastet einzustufen ist, wurden umfangreiche inelastische Berechnungen zur

Ermittlung der zyklischen Dehnungsschwingbreiten und der zeitlichen Spannungsverläufe durchgeführt. Auf diesem Wege konnte ein positiver Nachweis unter Benutzung der im ASME-CC N 47 niedergelegten linearen Schadensakkumulationshypothese geführt werden.

#### 5.4 Schlußfolgerungen für die Arbeiten des Fachkreises "Regelwerk"

- Die beim THTR-DE angestellten Überlegungen und angewandten Verfahren der Komponentenauslegung, der Herstellung und der Qualitätssicherung sind teilweise auch für den Einsatztemperaturbereich oberhalb 800 °C nutzbar.
- Die Einteilung der Komponentenbelastung in Betriebs- und Notfälle genügt für einen Prototyp wie den THTR. Für ein Regelwerk wird jedoch empfohlen, ein verfeinertes Schema der Einteilung in Betriebs- und Notfälle zu entwickeln und diesem ein gestuftes System von Festigkeitsnachweishführungen zuzuordnen.
- Die verschiedenen Tests im ASME-CC N 47 zur Begrenzung der überelastischen Dehnungen haben sich in der praktischen Anwendung zwar als zum einfachen Nachweis niedrig belasteter Bauteile geeignet erwiesen; bereits bei mäßig belasteten Bauteilen führen sie wegen der Konservativität der Annahmen und Ansätze nicht mehr zum Ziel. Daher wurden für den THTR (für Einsatztemperaturen unterhalb 650 °C) bereits Modifikationen erarbeitet. Für Temperaturen oberhalb 800 °C trifft dies in verstärktem Maße zu.
- Bei der Auslegung von HTR-Wärmetauschern sollte folgender Gesichtspunkt Berücksichtigung finden:

Durch die unterschiedlichen Temperaturen der Heizrohre und der Tragplatten und durch das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten von Austenit und Ferrit ergeben sich in den Helissenrohren von Wendelrohrwärmetauschern relativ hohe Zwangsbeanspruchungen.

Bei der Auslegung von Wärmetauschern für hohe Temperaturen sollte auf eine Begrenzung derartiger Spannungen durch konstruktive Maßnahmen besonders geachtet werden. Beispielsweise sollten Mischverbindungen zwischen Werkstoffen mit unterschiedlichen thermischen Kenngrößen nur dann zur Anwendung kommen, wenn sichergestellt ist, daß die durch diese Verbindung hervorgerufenen Zwängungen nicht lebensdauerbestimmend für die Komponente werden.

- Im Bereich hoher Temperaturen sind weitere Grundlagenuntersuchungen zur Beurteilung des Verhaltens fehlerbehafteter Bauteile notwendig.

Fazit:

Die Erfahrungen bei der Abwicklung des THTR und deren Übertragbarkeit auf ein HTR-Regelwerk mit Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C werden dargestellt.

Die Einteilung der Komponentenbelastung in zwei Kategorien genügt für einen Prototyp wie den THTR. Für das Regelwerk wird jedoch empfohlen, ein der Anlage angepaßtes Schema der Einteilung in Betriebs- und Notfälle zu entwickeln und diesem ein gestuftes System von Festigkeitsnachweisen zuzuordnen.

Dokumentation zu Kapitel 5:

- Darstellung der Erfahrungen von RWTÜV und HRB bei der Abwicklung des THTR RWTÜV;  
Thissen

## 6. Sicherheitstechnisches Konzept als Rahmenvorgabe

Das hier dargestellte sicherheitstechnische Konzept soll nicht Gegenstand einer Regel werden. Es sollen jedoch sicherheitstechnische Lösungsmöglichkeiten für die beiden Komponenten

- He/He-Wärmetauscher und
- Röhrenspaltöfen

dargestellt werden.

Diese Komponenten sind jedoch aufgrund ihrer Auslegungsdaten sowie den Einsatzbedingungen bei Betriebs- und Störfällen (Kapitel 2.3) für eine Anlage zur Nutzung nuklearer Prozeßwärme (PNP) von zentraler Bedeutung.

Diese punktuelle Betrachtung einiger Sicherheitsaspekte soll Lösungswege aufzeigen, die für eine genehmigungsfähige Auslegung beschriftet werden können.

Das anschließend dargestellte sicherheitstechnische Konzept stellt eine Rahmenvorgabe dar, die zur Erarbeitung der Grundlagen zu einem Regelwerk über die Auslegung von HTR-Komponenten oberhalb 800 °C benötigt werden. Andere sicherheitstechnische Konzepte oder Weiterentwicklungen sind denkbar.

### 6.1 Sicherheitsprinzipien

Die Sicherheit einer kerntechnischen Anlage ist entsprechend den BMI-Kriterien durch die beiden Sicherheitsprinzipien zu gewährleisten:

1. Störfallverhinderung (1. Sicherheitsprinzip) z. B. durch:

- Inhärente Sicherheit der Anlage
- fail-safe-Verhalten

- hochwertige Auslegung und Qualitätssicherung
- Betriebsweise und -überwachung

Alle Systeme der Anlage werden so ausgelegt, hergestellt und ständig überwacht, daß Störungen ausreichend unwahrscheinlich werden.

Darüberhinaus ist es erforderlich, neben den Anforderungen an die Qualität der Anlage sowie die Qualifikation des Personals Maßnahmen zur Beherrschung von Störfällen zu treffen.

## 2. Störfallbeherrschung (2. Sicherheitsprinzip) z. B. durch:

- zuverlässige Detektion der dennoch auftretenden Störfälle
- Störfallbeherrschung durch zusätzliche konstruktive Einrichtungen (passive und aktive Sicherheitssysteme)

### 6.2 Erreichung der Schutzziele

Für sicherheitstechnisch wichtige druck- und aktivitätsführende Komponenten der Reaktoren, die im Niedertemperaturbereich, d. h. im Temperaturbereich mit zeitunabhängigen Werkstoffeigenschaften, betrieben werden, liegen genehmigte und im Betrieb erprobte sicherheitstechnische Konzepte vor. Diese Konzepte stützen sich zur Erreichung der Schutzziele vorwiegend auf Maßnahmen, die sicherstellen, daß die entsprechenden Komponenten den während des bestimmungsgemäßen Betriebes und bei Störfällen maximal auftretenden Belastungen hinreichend oft ausgesetzt werden können. Sie erfüllen das erste Sicherheitsprinzip "Störfallverhinderung".

Eine vergleichsweise starke Abstützung auf dieses erste Sicherheitsprinzip bei den Komponenten, die im Zeitstandbereich bis ungefähr 950 °C beansprucht werden, könnte zur Zeit zu genehmigungsfähigen Schwierigkeiten führen. Durch die stärkere Inanspruchnahme des zweiten Sicherheitsprinzips "Störfallbeherrschung" kann dennoch die volle Erreichung der Schutzziele für die Anlagenteile nachgewiesen werden.

Bei der Kopplung einer Chemie-Anlage mit einem Hochtemperaturreaktor zum Zwecke der nuklearen Kohlevergasung sind neben den HTR-typischen Auslegungsdaten bei der Konzeption des Reaktorsystems im wesentlichen die folgenden NPW-spezifischen Einsatzbedingungen zu berücksichtigen:

- Hohe Kühlgastemperatur (950 °C)
- Prozeßgas in der Nähe des Reaktors
- Begrenzung des Übertritts von Tritium und eventueller kopplungsbedingter Aktivierungsprodukte in das Prozeßgas

Aus der Sicht der hier behandelten Fragestellung bildet für die Auslegung des He/He-Wärmetauschers und des Röhrenspaltofens neben der Beherrschung der verschiedenen Druckentlastungsstörfälle des Primär- und Sekundärkreislaufes die Beherrschung von Prozeßgas in der Reaktoranlage und in der Umgebung das zentrale Problem. Die Begrenzung der Tritiumfreisetzung sowie eventueller kopplungsbedingter Aktivierungsprodukte wird an dieser Stelle nicht behandelt, da der derzeitige Kenntnisstand aus entsprechenden F+E-Programmen noch keine diesbezüglichen Empfehlungen für die Auslegung erlaubt.

In ihren Auswirkungen auf die Bauteile des He/He-Wärmetauschers und des Röhrenspaltofens sind insbesondere folgende Störfälle zu betrachten:

1. Versagen der Prozeßgasleitung (Druckentlastung des Sekundärkreises)
2. Versagen der Zwischenkreislaufleitung mit Leck im Gasgenerator (Druckentlastung des Sekundärkreises)
3. Druckentlastung des Primärkreislaufes und Prozeßgaseinbruch
4. Versagen des He/He-Wärmetauschers bzw. Röhrenspaltofens bei Normalbetrieb

Die Störfälle 1 und 2 können bei einem unterstellten Bruch in der Prozeßgasleitung oder der Zwischenkreislaufleitung im Reaktorschutzgebäude mit folgenden Möglichkeiten beherrscht werden:



- a. Die Prozeßgasleitung und die Zwischenkreislaufleitung erhalten eine Ummantelung, die gegen den gleichen Druck und die gleiche Temperatur ausgelegt ist. Der Zwischenraum zwischen Innenrohr und Ummantelung wird inertisiert und überwacht.

#### Prozeßgasleitung mit Ummantelung

Das Prozeßgas wird im Reaktorschutzgebäude von einer Doppelrohrleitung eingeschlossen, wobei sowohl die innere als auch die äußere Rohrleitung auf den Prozeßgasdruck sowie eine Temperatur von etwa 500 °C ausgelegt werden.

Wird eine Leckage im Zwischenraum detektiert, so wird der betreffende Kreislauf abgeschaltet, wodurch das Außenrohr nur kurzzeitig belastet wird und ein Folgeversagen ausgeschlossen werden kann.

#### Heiße Zwischenkreislaufleitung mit Ummantelung

Bei Ausführung dieser Rohrleitung in einschaliger Bauweise würde bei einem Versagen ohne zusätzliche Störfallbedingungen lediglich Helium des Sekundärkreislaufes in das Reaktorschutzgebäude austreten. Erst bei einem zusätzlich zu unterstellenden Versagen der Wärmetauscherrohre im Gasgenerator kann von dort Prozeßgas, vermischt mit Helium, über die Zwischenkreislaufleitung in das Reaktorschutzgebäude gelangen.

Infolgedessen erhält auch die Zwischenkreislaufleitung eine auf den vollen Betriebsdruck ausgelegte Ummantelung und hat dann folgenden Aufbau (modifizierte PNP 500-Lösung):

- heißgehendes, druckmäßig geringbelastetes Gasführungsrohr
- Wärmeschutz des Tragrohres
- betriebsdruckbeaufschlagtes Tragrohr
- mit Volldruck belastbares Außenrohr, bei Bedarf je nach Werkstoffwahl mit einem Wärmetauscherschutz

Das Außenrohr kann wiederkehrend zerstörungsfrei geprüft werden.

Bei Versagen des Tragrohres der Zwischenkreislaufleitung tritt Gas in den Raum zwischen Tragrohr und Außenrohr und wird dort detektiert. Die Anlage wird abgefahren.

- b. Der Innenraum bzw. Teile davon werden inertisiert.

Wenn das Reaktorschutzgebäude inertisiert bzw. ein Teil gebunkert und ebenfalls inertisiert wird, z. B. mit Stickstoff, können sich beim Einströmen von brennbaren Gasen keine explosiven Gemische bilden. Die Prozeßgasleitung und die heiße Zwischenkreislaufleitung benötigen in diesem Falle keine zusätzliche inertisierte Umhüllung.

Sicherheitstechnisch wichtige Komponenten innerhalb des Reaktorgebäudes sind jedoch gegen ein zu unterstellendes Versagen der Prozeßgas- und Zwischenkreislaufleitung auszulegen oder zu schützen (z. B. durch räumliche Trennung). Ferner sind die Trennwände zwischen dem Primär- und Sekundärkreis im He/He-Wärmetauscher und Röhrenspaltöfen gegen die Belastungen einer damit verbundenen sekundärseitigen Druckentlastung auszulegen, oder es sind Querschnittsbegrenzungen vorzusehen, so daß es nicht zu einer großflächigen Druckentlastung des Primärkreises als Folgeversagen kommen kann.

Beim Eintritt des Störfalles 3 wird davon ausgegangen, daß mit Auftreten der Druckentlastung im Primärkreis die Spaltrohre des Röhrenspaltöfens, die Wärmetauscherrohre sowie Sammler und Rückführrohr des He/He-Wärmetauschers unter Sekundärkreisdruck (Innendruck) geraten. Bei Eintritt des Störfalles koppeln dann jeweils 2 schnellschließende Absperrarmaturen die Komponenten aus dem System aus. Der Störfall würde demnach durch aktive Maßnahmen beherrscht.

Ein Versagen des He/He-Wärmetauschers bzw. Röhrenspaltofens z. B. durch ein Leck an Teilen der Komponenten aufgrund von Betriebsbeanspruchungen (Störfall 4) hätte wegen des größeren Drucks im Sekundärkreis gegenüber den Primärkreislauf keinen größeren Übertritt der Gase vom Primär- in den Sekundärkreis zur Folge. Geringfügige in den Sekundärkreis freigesetzte Aktivitäten werden detektiert. Bei Erreichen entsprechender Grenzwerte wird die Anlage abgeschaltet und die entsprechenden Armaturen an den Durchdringungen des Reaktorschutzgebäudes geschlossen. Von den Komponenten He/He-Wärmetauscher und Röhrenspaltofen völlig unabhängige NWA-Systeme führen die Nachwärme ab.

### Fazit:

Mit der Beschreibung eines sicherheitstechnischen Konzeptes einer HTR-Anlage zur Nutzung nuklearer Prozeßwärme werden in einer Rahmenvorgabe die Voraussetzungen für die Genehmigungsfähigkeit von wärmetauschenden Komponenten mit Arbeitstemperaturen oberhalb 800 °C zusammengestellt.

Unzulässige Leckagen vom Primär- zum Sekundärsystem (RSO, He/He-WT) können durch vom Reaktorschutzsystem ausgelöste Sicherheitsaktionen (Armaturen) verhindert werden. Ein unzulässiger Prozeßgaseinbruch in das Reaktorschutzgebäude durch Versagen der Prozeßgas- bzw. Zwischenkreislaufleitung innerhalb des Reaktorschutzgebäudes kann durch die beispielhaft aufgezeigten Doppelmantellösungen vermieden werden.

Eine andere Möglichkeit, explosive Gemische im Reaktorschutzgebäude auszuschließen, ist die Inertisierung bzw. Teilinertisierung des Reaktorschutzgebäudes.

Das beschriebene sicherheitstechnische Konzept einer Anlage zur Nutzung nuklearer Prozeßwärme zeigt für die hier beispielhaft behandelten Störfälle des He/He-Wärmetauschers und des Röhrenspaltofens Lösungsmöglichkeiten zur Beherrschung auf. Das Konzept stützt sich auf die Sicherheitsprinzipien "Störfallverhinderung" und "Störfallbeherrschung" ab.

Dokumentationen zu Kapitel 6:

- Sicherheitstechnisches Konzept der PNP-Anlage RWTÜV;  
Hahn.

Literatur zu Kapitel 6:

- /1/ Gesetz für die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren  
Atomgesetz vom 21.12.1959 in der Fassung vom 31.10.1976
- /2/ Verordnung über den Schutz von Schäden durch ionisierende Strahlen in der Fassung vom 20.10.1976  
Strahlenschutzverordnung (-Strl. SchV) in der Fassung vom 27.05.1981
- /3/ a) BMI-Kriterien (LWR)  
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke  
Bekanntmachung von Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke vom 03.11.1977  
b) BMI-Kriterien  
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke  
Sicherheitskriterien für Anlagen zur Energieerzeugung mit gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren  
- Entwurf 1980 -  
c) IWRS - Inspektion, Wartung, Reparatur, Stilllegung  
BMI - Richtlinien für den Strahlenschutz des Personals bei der Durchführung von Instandhaltungsarbeiten in Kernkraftwerken mit LWR.  
Teil I: Die während der Planung der Anlage zu treffende Vorsorge, Fassung vom 10.05.1978  
Teil II: Strahlenschutzmaßnahmen während der Inbetriebnahme und des Betriebs der Anlage, Fassung vom 23.06.1981
- /4/ RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren  
3. Ausgabe, 14. Okt. 1981

/5/ D. Smidt:

Reaktorsicherheitstechnik

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1979

## 7. Werkstoffe

Die Auslegung und Beurteilung von HTR-Komponenten mit Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C hängen entscheidend von der Bereitstellung geeigneter hochwarmfester Werkstoffe ab. Die Werkstoffkennwerte, insbesondere zeitabhängige Kennwerte, die das Werkstoffverhalten unter Belastung charakterisieren, sind die Basis für die Komponentenauslegung und Lebensdauerbestimmung.

Zur Sicherstellung dieser Werkstoffkennwerte auch im Verlauf der Fertigung von Komponenten oder Halbzeugen sind zudem entsprechende qualitätssichernde Maßnahmen festzulegen, die eine hinreichende Überwachung und Dokumentation aller wesentlichen Fertigungsschritte beinhalten.

### 7.1 HTR-Strukturwerkstoffe

Entsprechend den hohen Einsatztemperaturen von bis zu 950 °C von HTR-Komponenten kommen nur Werkstoffe in Betracht, die eine ausreichende

- Zeitstandfestigkeit
- Ermüdungsfestigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Langzeitstrukturstabilität

aufweisen. Ein weiterer Gesichtspunkt bei der Werkstoffauswahl ist die zerstörungsfreie Prüfbarkeit mit derzeit geläufigen Methoden.

Unter den derzeit kommerziell verfügbaren Legierungen erfüllen die Nickelbasislegierungen

- NiCr 22 Co 12 Mo (Handelsname: INCONEL 617)
- NiCr 22 Fe 18 Mo (Handelsname: HASTELLOY X)
- NIMONIC 86 (identischer Handelsname)

und die in der Kerntechnik bereits eingeführte Eisenbasislegierung

- X 10 NiCrTiAl 32 20 (Handelsname: INCOLOY 800 H)

die gestellten Anforderungen.

Die genannten Werkstoffe sind Knetlegierungen, die warmumformbar und schweißbar sind. Im Anhang A sind die derzeit verfügbaren Werkstoffkenndaten in Datenblättern zusammengefaßt. Dabei wurde der Einfluß verschiedener Halbzeugformate nicht gesondert ausgewiesen. Dies wird möglich sein, wenn weitere diesbezügliche Ergebnisse aus Werkstoffuntersuchungen vorliegen.

## 7.2 Kennwerte physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Kennwerte physikalischer und mechanischer Eigenschaften der Werkstoffe dienen der Ermittlung der Beanspruchungen von Komponenten infolge thermischer und mechanischer Belastungen sowie der Komponentenauslegung anhand von Regeln.

Kennwerte physikalischer Eigenschaften in Zusammenhang mit der Beanspruchungsermittlung sind:

- Elastizitätsmodul
- Schubmodul
- Wärmeleitfähigkeit
- thermischer Ausdehnungskoeffizient (mittlerer und differentieller)
- spezifische Wärme.

Zur Bestimmung des Elastizitäts- und Schubmoduls dienen im Bereich hoher Temperaturen ausschließlich dynamische Meßverfahren, um zeitabhängige Effekte auszuschließen.

Kennwerte mechanischer Eigenschaften lassen sich gliedern in Daten zu

- Kurzzeiteigenschaften (zeitunabhängiges Werkstoffverhalten)
- Langzeiteigenschaften (zeitabhängiges Werkstoffverhalten)



- Ermüdungseigenschaften (Werkstoffverhalten unter Belastungswechseln)

Kennwerte zu Kurzzeiteigenschaften sind Ergebnisse aus Warmzugversuchen. Für die Bildung von Auslegungskennwerten erforderlich sind:

- die Streckgrenze, bzw. 0,2 %-Dehngrenze
- die 1 %-Dehngrenze
- die Zugfestigkeit.

Für eine über die Bildung von Auslegungskennwerten hinausgehende Bewertung der Werkstoffe sind gegebenenfalls Angaben über die

- Bruchdehnung und
- Brucheinschnürung

im Warmzugversuch und

- Kerbschlagarbeit

im Kerbschlagbiegeversuch erforderlich. (Die Kerbschlagarbeit kann für zeitstandbeanspruchte Komponenten oberhalb 800 °C nicht Basis eines Sicherheitskonzeptes sein.)

Mit steigender Temperatur werden die Ergebnisse des Warmzugversuchs zunehmend abhängig von der Abzugsgeschwindigkeit, die so vorgegeben sein kann, daß sich

- konstante Dehngeschwindigkeiten oder
- konstante Spannungsänderungsgeschwindigkeiten

ergeben (siehe auch Kap. 3.4).

In den DIN-Normen zur Werkstoffprüfung wird auf diese Abhängigkeit nicht eingegangen, da sie bei niedrigen Temperaturen nicht signifikant ist.

Zur Bildung von Auslegungskenndaten aus Warmzugversuchen sind solche Ergebnisse heranzuziehen, die mit unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten ermittelt wurden. Der Bereich der zu wählenden Dehngeschwindigkeiten sollte denen der in Komponenten auftretenden nach Möglichkeit entsprechen, bzw. auf diese sicher extrapolierbar sein. Dies ist zu berücksichtigen, da im betrachteten Temperaturbereich mit steigender Temperatur erst bei hohen Dehngeschwindigkeiten eine zeitunabhängige plastische Verformung auftritt.

Kennwerte zum Langzeitverhalten werden in Kriech- bzw. in Zeitstandversuchen ermittelt, wobei für die Bildung von Auslegungskennwerten die

- 1 % Zeitdehngrenze
- Zeitstandfestigkeit

anzugeben sind. Für eine darüber hinaus gehende Bewertung der Kriecheigenschaften des Werkstoffs sind Angaben über die

- Brucheinschnürung
- Bruchdehnung
- Beginn und Verlauf des tertiären Kriechens

einzubeziehen.

Die Ermüdungseigenschaften eines Werkstoffes werden je nach Art der Wechselbelastung unterteilt in:

- Ermüdung nach hohen Lastwechselzahlen (High Cycle Fatigue = HCF)
- Ermüdung nach geringen Lastwechselzahlen (Low Cycle Fatigue = LCF).

Für die Bildung von Auslegungskenndaten zur Abdeckung von spannungsgesteuerten Schwingungen (HCF) ist die

- Lastspielzahl bis zum Bruch als Funktion der Spannungsschwingbreite und der Temperatur

erforderlich, während zur Auslegung gegen dehnungskontrollierte Lastwechsel (LCF)

- Lastspielzahl bis zum Bruch als Funktion der Dehnschwingbreite und der Temperatur
- Lastspielzahl bis zum Anriß als Funktion der Dehnschwingbreite und der Temperatur

benötigt werden.

Die Kennwerte physikalischer und mechanischer Eigenschaften können im Rahmen üblicher Verfahren und Grenzen extrapoliert werden, wobei sich die Extrapolation auf eine hinreichend große Datenbasis stützen muß.

### 7.3 Stoffgesetze zum Werkstoffverhalten

Stoffgesetze sind die Voraussetzung zur inelastischen Analyse des Komponentenverhaltens unter Belastung. Sie dienen der werkstoffbedingten, nichtlinearen Berechnung von Spannungs- und Verschiebungsfeldern bei vorgegebener Belastung und ermöglichen so eine bessere Nutzung des vorhandenen Werkstoffpotentials bei Einhaltung des erforderlichen Sicherheitsabstandes.

Für das bei Belastung zu betrachtende Stoffgesetz ist eine möglichst präzise Beschreibung anzustreben, da nur dies die Voraussetzung für spätere "vereinfachte Stoffgesetze" sein kann, die ingenieurmäßig besser handhabbar und zugleich für jede Belastungssituation ausreichend konservativ sind. Ihre Entwicklung setzt folglich eine hinreichende Erfahrung im Umgang mit Stoffgesetzen voraus, die heute noch weitgehend fehlt.

Entsprechend dem zu betrachtenden Werkstoffverhalten sind Stoffgesetze zum

- Plastifizieren (zeitunabhängiges Werkstoffverhalten)
- Kriechen (zeitabhängiges Werkstoffverhalten)
- Ermüden (Verfestigung, Entfestigung, Belastungsumkehr)

sowie ihrer Wechselwirkung zu erarbeiten. Da mit steigender Temperatur das Plastifizieren gegenüber dem Kriechen in den Hintergrund tritt, kommen für Temperaturen oberhalb 800 °C solche Stoffgesetze eher zum tragen, die vornehmlich das Kriechen und Ermüden beschreiben.

Stoffgesetze werden in der Regel an Laborproben unter einachsiger Belastung gewonnen bzw. überprüft. Obwohl es derzeit kein allgemein gültiges Stoffgesetz gibt, welches präzise das Werkstoffverhalten beschreibt, existieren doch Ansätze, die sich bislang in Teilbereichen als tragfähig erweisen.

Die im einachsigen Versuch gewonnenen Stoffgesetze stellen einen Sonderfall der für mehrachsige Belastungen anzuwendenden Stoffgesetze dar. Derzeit existieren einige Modelle bzw. Theorien zur Berechnung des Bauteilverhaltens unter mehrachsiger Belastung im Bereich niedriger und hoher Temperaturen. Sie beschreiben jedoch Werkstoffbelastungen und Komponentenbeanspruchungen nur näherungsweise und bedürfen daher einer Weiterentwicklung. Eine vorbehaltlose Empfehlung eines Modells für Hochtemperaturbedingungen ist zur Zeit noch nicht möglich.

Unter den zu betrachtenden Modellen der inelastischen Analyse des Bauteilverhaltens sind das

- ORNL-Modell
- INTERATOM-Modell
- Krempf-Modell

für den Hochtemperaturbereich von Bedeutung. Mit jedem dieser Modelle ist man in der Lage, elastisch-plastisches Verhalten, Kriechen und Ermüden sowie deren Wechselwirkung zu beschreiben. Zur Ermittlung der Spannungen und Dehnungen im Falle mehrachsiger Belastungen dient die Invariantentheorie, die auf der von Mises'schen Volumenkonstanz bei inelastischer Verformung beruht.

#### 7.4 Werkstoffbegutachtung

Die Werkstoffbegutachtung umfaßt alle notwendigen Prüfungen, deren Wertung die Aussage ermöglicht, ob der betreffende Werkstoff für die vorgesehene Verwendung, hier für HTR-Komponenten mit Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C, geeignet ist.

Die Werkstoffbegutachtung gliedert sich in

- Werkstoffbegutachtungsplan und
- Werkstoffbegutachtungsprogramm.

Der Werkstoffbegutachtungsplan enthält die grundsätzlichen Anforderungen an die Werkstoffbegutachtung, die sich besonders ergeben aus

- dem Werkstoff und seiner Verarbeitung incl. Schweißen
- der sicherheitstechnischen Bedeutung in Bezug auf den Werkstoffeinsatz
- der Beanspruchung durch Temperatur, mechanische Belastungen, Bestrahlung und Korrosion.

Die am Werkstoff mit seinen Erzeugnisformen sowie der Schweißverbindungen durchzuführenden Untersuchungen und Ergebnisaufweise sind Inhalt des Werkstoffbegutachtungsplanes.

Ein Entwurf eines Rahmenplanes zur Werkstoffbegutachtung liegt vor. Offene Punkte sind zur Zeit noch die erforderliche Nachweistiefe der Begutachtung sowie die Abdeckung aller möglichen Werkstoffbeanspruchungen.

Prüfungen, die als typische Abnahmeversuche gelten, sind nicht Gegenstand des Werkstoffbegutachtungsplanes.

Das Werkstoffbegutachtungsprogramm baut auf dem Werkstoffbegutachtungsplan auf und regelt die Durchführung der erforderlichen Werkstoffuntersuchungen, soweit sie nicht schon in genügendem

Umfang anderweitig durchgeführt wurden. Er berücksichtigt verschiedene Erzeugnisformen in den vorgesehenen Abgrenzungen einschließlich der technischen Möglichkeiten der antragstellenden Hersteller und der angestrebten Verarbeitungsverfahren.

Die bei der Begutachtung ermittelten Daten finden insbesondere Verwendung im Rahmen der festigkeitsmäßigen Komponentenbeurteilung und bilden damit die Grundlage für Konstruktion und Berechnung.

#### 7.5 Vorschriften für die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen

Die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen für Bauteile mit hoher Anwendungstemperatur und hoher sicherheitstechnischer Bedeutung bedarf der Festlegung geeigneter Herstellungsverfahren und der Überwachung und Dokumentation einzelner Herstellungsschritte. Ziel derartiger Vorschriften ist die Qualitätssicherung für die Erzeugnisformen.

Die Punkte

- Anforderungen an die Werkstoffe
- Anforderungen an die Herstellung
- Herstellungsbegleitende Prüfungen
- Kennzeichnung der Erzeugnisformen
- Nachweis der Güteeigenschaften

sind Gegenstand der Vorschriften für die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen.

Der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitete Entwurf für die "Vorschriften zur Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen", lehnt sich im Aufbau an die KTA-Regel 3201.1 an. In ihm sind die für Austenite und Nickelbasislegierungen geltenden Regeln, soweit möglich, übernommen.

Der Entwurf enthält einstweilen beispielhafte Regelungen nur für die wichtigsten Erzeugnisformen (Bleche, Schmiedestücke, Rohre, Wärmetauscherrohre) und bedarf diesbezüglich der Ergänzung.

Für die werkstoffspezifische Festlegung sind, analog den KTA-Werkstoffblättern, entsprechende Anhänge zu erstellen. Als Basis für die Werkstoffanhänge zum HTR-Regelwerk sind entsprechende Spezifikationsentwürfe der Werkstoffe NiCr 22 Co 12 Mo und NiCr 22 Fe 18 Mo und die aus den Werkstoffuntersuchungen abzuleitenden Daten anzusehen.

Fazit:

Für die wärmetauschenden Komponenten können marktgängige Werkstoffe nach einem vorgeschlagenen Werkstoffbegutachtungsplan in eine atomrechtliche Genehmigung eingebracht werden. Die benötigten Werkstoffdaten für Konstruktion und Auslegung sind weitgehend vorhanden, die Absicherung des Langzeitverhaltens muß jedoch durch weitere Datenbelegungen fortgeführt werden. Für inelastische Analysen und zur Bewertung des Betriebsverhaltens sind erste Ansätze von Stoffgesetzen vorhanden. Zur Absicherung der Regelfähigkeit bedarf es noch der theoretischen Auswertung laufender experimenteller Versuche unter betriebssimulierenden Belastungen an bauteilähnlichen Geometrien. Ein Vorschlag zur Regelung der Herstellung von Werkstoffen und Halbzeugen liegt vor.



Dokumentationen zu Kapitel 7:

- Entwurf eines Werkstoffbegutachtungsplanes für austenitische Fe-Ni-Cr- und Sonderlegierungen auf Ni-Basis, die im Hochtemperaturreaktorsystem für sicherheitstechnisch wichtige Anlageteile eingesetzt werden sollen. RWTÜV;  
Thissen
- Stellungnahme zu den Unterlagen des RWTÜV HRB;  
Bodmann
- Vorschriften für die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen für gasgekühlte Reaktoren mit Auslegungstemperaturen oberhalb 800 °C RWTÜV;  
Just
- Diskussion der für die Durchführung inelastischer Analysen angewandten und benötigten Stoffgesetze IA;  
Seehafer
- Stellungnahme zur Thematik "Stoffgesetze" GHT/IA;  
Schneider
- Versuche an bauteilrelevanten Proben im IRW als Grundlage für ein HTR-Regelwerk KFA; Rödig,  
Over, Penkalla  
Schubert, Nickel
- Werkstoffverhalten unter komplexer Beanspruchung HRB; GHT/IA; BBC;  
KFA;  
Bodmann, Breuer,  
Raule, Rödig
- Zeitstand- und Behälterversuche an rohrförmigen Bauteilen mit für den Hochtemperaturreaktor relevanten Abmessungen im Temperaturbereich 850 bis 1020 °C. MPA;

Literatur zu Kapitel 7:

- /1/ W. C. Müller:  
Universal Solutions for Simple Thermodynamic Bodies  
Arch. Rat. Mech. Anal. 35 (1969)
- /2/ J. M. Corum et. al.:  
Interim Guidelines for Detailed Inelastic Analysis of High  
Temperature Reactor System Components  
ORNL 5014 (1974)
- /3/ J. F. Besseling:  
A Theory of Elastic, Plastic and Creep Deformation of an Ini-  
tially Isotropic Material Showing Anisotropic Strain-Hardening  
Creep, Recovery and Secondary Creep  
Trans. ASME, J. o. Appl. Mech. 25 (1958)
- /4/ D. Kujawski, Z. Mroz:  
A viscoplastic model and its application to cyclic Loading  
Acta Mechanica 36 (1980)
- /5/ J. M. Corum:  
Future Needs for Inelastic Analysis in Design of High  
Temperature Nuclear Plant Components  
Comp. Meth. in Nonlin. Struc. o. Solid Mech. 13 (1981)
- /6/ E. P. Cernocky, E. Krempl:  
A Theory of Viscoplasticity Based on Infinitesimal Total  
Strain  
Acta Mechanica 36 (1980)
- /7/ C. E. Pugh:  
Summary of Current Constitutive Equations for LMFBR Applica-  
tions  
Working Group Meeting on Constitutive Equations for Inelastic  
Design Analyses. Centre D'Etudes Nucleaire, Saclay, France,  
August 1981

- /8/ D. N. Robinson:  
Constitutive Equation Development - Unified Model  
wie bei /7/
- /9/ P. Perzyna:  
On Thermodynamic Foundation of Viscoplasticity  
in "Mechanical Behaviour of Materials under Dynamic Loads"  
IUTAM Symp., San Antonio 1967, Springer 1968 (ed. by  
U. S. Lindholm)
- /10/ Y. F. Dafalias, E. P. Popov:  
Plastic Internal Variables Formalism of Cyclic Plasticity  
Journ. of Appl. Mech. 43 (1976)
- /11/ M. A. Eisenberg, A. Phillips:  
On Non-linear Kinematic Hardening  
Acta Mech. 5 (1968)
- /12/ M. A. Eisenberg, C. W. Lee, A. Phillips:  
Observations on the Theoretical and Experimental Foundations  
of Thermoplasticity  
Int. J. Solids a. Structures 13 (1977)
- /13/ D. C. Stouffer, A. S. Wineman:  
A Constitutive Representation for Linear Aging, Environmental  
dependent Viscoelastic Materials  
Acta Mechanica 13 (1972)
- /14/ E. Krempl:  
The Role of Aging in the Modeling of Elevated Temperature  
Deformation  
Int. Conf. Creep Fracture;  
Uni. Coll. of Swansea UK 1981

- /15/ J. Lemaitre, J. L. Chaboche:  
A Non-Linear Model of Creep-Fatigue Damage Cumulation and  
Interaction  
IUTAM Sym. Göteborg, Springer (1974)
- /16/ S. Majumdar, P. S. Maiya:  
A Mechanistic Model for Time-Dependent Fatigue  
J. Eng. Mat. a Techn. Vol. 102 (1980)
- /17/ F. K. G. Odqvist, J. Hult:  
Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe  
S. 227, Springer (1962)
- /18/ A. M. Freudenthal, P. F. Gou:  
Second Order Effects in the Theory of Plasticity  
Acta Mechanica 8 (1969)

## 8. Schadensakkumulation

Aufgrund von betrieblichen Temperatur- bzw. Druckschwankungen treten stets auch Be- und Entlastungsvorgänge bzw. Wechselbeanspruchungen auf. Daher müssen Bauteile im Hochtemperaturbereich gegen Kriechen und Ermüden ausgelegt werden. Der Bestimmung des Verbrauchs an Lebensdauer, hier als Schadensakkumulation bezeichnet, kommt eine zentrale Bedeutung zu, und zwar sowohl hinsichtlich des Lebensdauerungsverbrauchs im Normalbetrieb als auch hinsichtlich der Auswirkungen von Störfällen auf die Lebensdauer einer im Hochtemperaturbereich betriebenen Komponente. Dabei muß dem Verbrauch an Lebensdauer durch Kriech- und durch Ermüdungsvorgänge Rechnung getragen werden.

Das derzeit für die Auslegung von Komponenten im Hochtemperaturbereich angewendete amerikanische Regelwerk ASME-CC N 47 bewertet den Lebensdauerungsverbrauch mittels einer linearen Schadensakkumulationsregel. Dabei wird der durch Kriechen bzw. Ermüden verursachte Lebensdauerungsverbrauch zunächst getrennt anhand von Auslegungskurven ermittelt. Die Auslegungskurven ergeben sich aus den durch Abschlagsfaktoren auf das Versagen von Kleinproben unter Laborbedingungen um Sicherheitsabstände abgeminderten Lebensdauerkurven, so daß ein Versagen der Komponente unter vergleichbaren Belastungen ausgeschlossen werden kann. Der jeweils so ermittelte Lebensdauerungsverbrauch für Kriechen und Ermüden wird anschließend zu einer Gesamtausnutzung zusammengefaßt, wobei, abhängig vom Werkstoff, teilweise eine Wechselwirkung zwischen Kriechen und Ermüden berücksichtigt wird.

Bei der Bewertung einer Schadensakkumulationsregel ist sowohl ihr Vermögen, entsprechende Versuchsergebnisse zu beschreiben, als auch ihre praktische Anwendbarkeit bei der Auslegung zu berücksichtigen. Mit ihr sollen möglichst alle die Lebensdauer beeinflussenden Beanspruchungsarten erfaßt und bewertet werden.

Folgende Methoden werden für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C diskutiert:

- Strainrange Partitioning
- frequenzmodifizierte Manson-Coffin-Regel
- Dehnungsakkumulation nach Hales
- Extrapolation auf Zeitstandergebnisse nach Timo
- graphische Extrapolation  $\log N_f = f(\log t_h)$
- lineare Schadensakkumulationsregel

Zur Klärung der Frage, welche Methoden auch im Bereich oberhalb 800 °C zur Anwendung im Sinne eines Regelwerkes kommen können, wurden daher im Rahmen des HTR-Projektes gewonnene Ergebnisse von Haltezeitversuchen bei 850 °C des Werkstoffs X 10 NiCrTiAl 32 20 und Literaturwerte mit den nach verschiedenen Methoden berechneten Kurven verglichen. Neuere Untersuchungen an NiCr 22 Co 12 Mo ergaben, daß dieser Werkstoff ein dem X 10 NiCrTiAl 32 20 ähnliches Verhalten aufweist, so daß diese beiden Werkstoffe bezüglich der Schadensakkumulation mit derselben Methode beurteilt werden können.

Aufgrund der Auswertung bezüglich dieser Methoden können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Keine Methode kann für sich in Anspruch nehmen, das Kriechermüdungsverhalten exakt zu beschreiben.
- Die Strainrange-Partitioning-Methode ist im Falle des X 10 NiCrTiAl 32 20 nicht anwendbar.
- Die Dehnungsakkumulationsmethode nach Hales ist derzeit noch zu wenig untersucht, als daß über ihre Brauchbarkeit eine endgültige Aussage möglich ist.
- Die Extrapolation auf Zeitstandergebnisse nach Timo und die graphische Extrapolation  $\log N_f = f(\log t_h)$ , die eine vereinfachte Anwendung der frequenzmodifizierten Manson-Coffin-Regel darstellt, sind in der Lage, konservative Abschätzungen von Lebensdauerkurven unter Berücksichtigung langer Haltezeiten zu erzeugen. Diese Methoden decken jedoch den Grenzfall der reinen Ermüdung nicht ab.

- In der linearen Schadensakkumulationsregel werden verschiedene Belastungsarten nicht differenziert betrachtet, so daß ihre Ergebnisse nur qualitativ richtig sind. Sie ist jedoch einfach anwendbar.

Für die Festschreibung in einem Regelwerk ist zu beachten:

- Mit der Extrapolation auf Zeitstandergebnisse können nur Lebensdauerkurven erzeugt werden, die Haltezeiteinflüsse bereits beinhalten.

Somit steht für einen differenzierten Festigkeitsnachweis, bei dem die Kriech- und Ermüdungsausnutzung getrennt ermittelt werden, z. Z. für die in Kap. 7.1 genannten Werkstoffe nur die lineare Schadensakkumulationsregel zur Verfügung. Sie wird wegen ihrer einfachen Handhabung für die Berechnung des Lebensdauer verbrauchs bei kombinierten Kriech-Ermüdungsbeanspruchungen sowohl bei konventionellen als auch bei nuklearen Kraftwerken angewendet.

Die Handhabung der linearen Schadensakkumulationsregel setzt die Erstellung adäquater Bezugskennlinien (Ermüdungskurven, Zeitstandkurven) voraus. Da das Ermüdungsverhalten bei Temperaturen oberhalb 800 °C in sehr starkem Maße dehnratenabhängig ist, muß die Erstellung der Ermüdungskurven gegenüber dem Vorgehen bei tieferen Temperaturen neu definiert werden.

Aus laufenden Untersuchungen, die diese Haltezeit- und Dehnrateneinflüsse berücksichtigen und sich an den erwarteten betrieblichen Gegebenheiten der jeweiligen Komponente orientieren, sind verbesserte Vorgehensweisen zur Bestimmung der Schadensakkumulation abzuleiten.

Da das Vorgehen bei der Kriech-Ermüdungsanalyse für die Ergebnisse elastischer Berechnungen nach dem ASME-CC N 47 sehr konservativ ist, wird der Schwerpunkt der weiteren Arbeiten auf der genauen Ermittlung des Kriechschädigungsanteils liegen, um Ermüdungskurven ohne Haltezeiten verwenden zu können. Auch ein möglicher Einfluß der Belastungsgeschichte wird z. Z. experimentell untersucht.

Fazit:

Eine Überprüfung der verschiedenen Schadensakkumulationsmethoden an Versuchsergebnissen aus dem HTR-Werkstoffprogramm zeigt, daß keine der untersuchten Methoden das Kriech-Ermüdungsverhalten genau genug beschreibt. Für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C gibt es zudem wenig Schrifttum.

Die lineare Schadensakkumulationsregel entsprechend der Vorgehensweise des ASME-CC N 47, aber mit eigens auf den Werkstoff und Temperaturbereich bezogenen zulässigen Grenzen, sollte zunächst aus praktischen Gründen für die Bewertung der zulässigen Betriebsdauer herangezogen werden. Sie kann jedoch zu unnötig konservativen Sicherheitsbeiwerten führen. Erst nach Abschluß der laufenden umfangreichen Versuche kann eine endgültige Empfehlung für eine Schadensakkumulationsregel gegeben werden.



Dokumentationen zu Kapitel 8:

- Probleme der Schadensakkumulation bei Belastungskollektiven MPA;  
Hoffmann
- Anwendung verschiedener Lebensdauer-Extrapolationsverfahren aus LCF-Haltereitzergebnissen an INCOLOY 800 H bei 850 °C GHT/IA;  
Meurer
- Neuere Ansätze zur Schadensakkumulation MPA;  
Hoffmann

Literatur zu Kapitel 8:

- /1/ S. Bhongbhibhat:  
Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1979)  
Heft 79 - 02
- /2/ R. Idler:  
Techn.-wiss. Bericht MPA-Stuttgart (1975)  
Heft 75 - 04
- /3/ H. Zenner:  
VDI-Berichte Nr. 302 (1979), S. 29 - 44
- /4/ L. F. Coffin:  
Proceedings of the International Symposium on Low-cycle fatigue Strength and Elasto-plastic Behaviour of Materials, Stuttgart (1979), S. 9/24
- /5/ S. S. Manson:  
NACA TN 2933 (1953)
- /6/ S. S. Manson:  
Experimental Mechanics, August 1968, pp. 349/361

- /7/ S. S. Manson:  
Experimental Mechanics 5 (1965), S. 193/226
- /8/ G. R. Halford und S.S. Manson:  
Trans. ASM, 61 (1968)
- /9/ S. S. Manson, G. R. Halford, M. H. Hirschberg:  
Symposium on Design for Elevated Temperature Environment  
American Society of Mechanical Engineers, New York, 1971,  
pp. 12 - 24
- /10/ S. S. Manson:  
ASTM STP 520, S. 744 - 755
- /11/ Diskussion zu 10: ASTM STP (1972), S. 775 - 782
- /12/ E. Krempl:  
WRC Bulletin 195 (1974), S. 63 - 193
- /13/ E. Krägeloh, S. Bhongbhibhat:  
Z. Werkstofftechnik 9 (1978), S. 352-358
- /14/ E. L. Robinson:  
Trans. Amer. Soc. mech. Eng. 60 (1938), S. 253-259
- /15/ M. A. Miner:  
J. appl. Mech. 12 (1945), S. A 159-A 164
- /16/ K. H. Kloos, J. Granacher, E. Abelt:  
Arch. Eisenhüttenwesen 49, (1978), S. 259-263
- /17/ W. Schütz, H. Zenner:  
Z. f. Werkstofftechnik 4 (1973), 25-33 u. 97-102
- /18/ H. Breitling, E. D. Grosser, H. Lorenz:  
Arch. Eisenhüttenwesen 48 (1977), S. 403-407

- /19/ W. Schoch, E. Krägeloh, J. Ewald:  
VGB Kraftwerkstechnik 58 (1978), S. 54-61
  
- /20/ D. P. Timo:  
Designing Turbine Components for Low-Cycle Fatigue  
in: Thermal Stresses and Thermal Fatigue  
ed.: D. H. Littler, Butterworths, London 1971
  
- /21/ S. Bhongbhibhat:  
Untersuchungen über das Werkstoffverhalten im Gebiet der Zeit-  
festigkeit zur Erstellung von Berechnungsunterlagen für über-  
wiegend thermisch beanspruchte Bauteile  
Techn. wiss. Berichte MPA-Stuttgart 79 - 02, 1979
  
- /22/ S. S. Manson:  
The Challenge of Unify Treatment of High Temperature Fatigue -  
A Partisan Proposal Based on Strainrange Partitioning  
ASTM STP 520, 1973, pp. 744 - 782
  
- /23/ R. Hales:  
CEGB Rep. RD/B/N 4877, 1980
  
- /24/ L. F. Coffin:  
in: Time-Dependent Fatigue of Structural Alloys  
ORNL - 5073, 1977
  
- /25/ H.-P. Meurer, H. Breitling, E. D. Grosser  
Fatigue and Creep-Fatigue Behaviour of High Temperature Alloys  
for HTR-Application  
Proc. IAEA Specialists Meeting on "High Temperature Metallic  
Materials for Application in Gas-Cooled Reactors", Wien, 1981
  
- /26/ H.-P. Meurer, P. Becker, O. Höppe, H. J. Kneier, E. D.  
Grosser:  
Developing Fatigue Design Data for INCOLOY 800 H at  
Temperatures above 760 °C  
SMIRT 6, L 9/4, Paris, 1981

- /27/ R. Schmitt, W. Scheibe, K. Anderko:  
Creep-Fatigue Interaction on 1.4948 Austenitic Stainless Steel, Including Irradiation Effects  
SMIRT 5, L12/7, Berlin, 1979
- /28/ H.-P. Meurer, G. Gnirß, W. Mergler, G. Raule, H. Schuster, G. Ullrich:  
Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von HTR-Werkstoffen bei Temperaturen bis zu 1000 °C  
demnächst in: Schriftenreihe Energiepolitik in Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1982
- /29/ L. F. Coffin:  
A Note on Low Cycle Fatigue Laws  
Journal of Materials, ILMSA, 6 (1971), 388-402
- /30/ D. P. Timo:  
Designing Turbine Components for Low-cycle Fatigue International Conference on Thermal Stresses and Thermal Fatigue, 23-26 September, 1969, Berkeley
- /31/ E. Krägeloh:  
Überlagerung von thermischer und mechanischer Beanspruchung bei Stählen - Einfluß von Kerben und Schweißungen  
VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Jahrbuch 1978, S. 37-44
- /32/ L. F. Coffin:  
Predictive parameters and their application to high temperature low cycle fatigue  
Proceedings of the Second International Conference on Fracture, Brighton, April 1969, S. 643/654
- /33/ J. D. Morrow:  
Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals  
ASTM Special Technical Publication Nr. 378 (1965), 45

- /34/ L. F. Coffin:  
The Concept of Frequency Separation in the Life Prediction for  
Time Dependent Fatigue  
in ASME-MPC Symposium on Creep-Fatigue Interaction MPC-3  
(1976), S. 349 - 364
- /35/ J. B. Conway, R. H. Stentz, J. T. Berling:  
Fatigue, Tensile and Relaxation Behaviour of Stainless Steels,  
Ohio 1975, Chapter 4, S. 82-111
- /36/ G. F. Harrison, M. J. Weaver:  
The Low Cycle Fatigue Behaviour of NIMONIC 90 at Elevated  
Temperature  
AGARD Conference Proceedings Nr. 243

## 9. Lastfallkategorien und Belastungen

### 9.1 Lastfallkategorien

Die Zuordnung der Lastfälle in die Anlagenzustände des bestimmungsgemäßen Betriebs wurde in Anlehnung an die KTA-Regel 3201.2 getroffen.

#### 9.1.1 Bestimmungsgemäßer Betrieb

##### (1) Normale Betriebsfälle

Normale Betriebsfälle sind Betriebszustände oder Betriebszustandsänderungen, für die die Anlage bei funktionsfähigem Zustand der Systeme vorgesehen ist. Es handelt sich insbesondere um Anfahren des Reaktors, Vollastbetrieb, Teillastbetrieb und Abfahren des Reaktors, einschließlich der bei diesen Betriebszustandsänderungen auftretenden Transienten.

##### (2) Anomale Betriebsfälle

Als anomale Betriebsfälle werden Abweichungen von den normalen Betriebsfällen bezeichnet, die durch Funktions- oder Schaltfehler der Komponenten selbst oder der Nachbarkomponenten entstehen und bei denen der anschließenden Fortführung des Betriebs keine sicherheitstechnischen Gründe entgegenstehen.

##### (3) Instandhaltungsvorgänge

Die Instandhaltungsvorgänge umfassen die Erstdruckprüfung (Komponenten- und Systemdichtigkeitsprüfung), wiederkehrende Prüfungen sowie Wartungs- und Reparaturvorgänge.

#### 9.1.2 Störfälle

##### (1) Notfälle

Notfälle sind solche Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb, bei denen ein Abfahren der Anlage erforderlich ist, um danach die betroffenen Komponenten zu prüfen oder die Ursache der Störung zu beseitigen. Sie haben eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit.

## (2) Schadensfälle

Schadensfälle sind solche Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb, die aus sicherheitstechnischen Gründen eine Fortführung des Betriebs nicht zulassen. Sie haben eine extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. sind postulierte Störfälle.

### 9.2 Betriebsstufen

Die Ermittlung und Begrenzung der Beanspruchungen und Belastungen für die verschiedenen Betriebsstufen hat im Rahmen einer Analyse des mechanischen Verhaltens zu erfolgen. Hierbei werden die tatsächlichen Belastungen sowie die jeweiligen Temperaturen zugrunde gelegt.

#### 9.2.1 Stufe A

Die Beanspruchungen aus den normalen Betriebsfällen sind in diese Stufe einzuordnen. Die festigkeitsmäßige Absicherung der Komponenten erfolgt entsprechend Stufe B.

#### 9.2.2 Stufe B

Der Stufe B werden im allgemeinen die Lastfälle des anomalen Betriebes zugeordnet. Die Begrenzung der Beanspruchungen (Spannungen und Verzerrungen) und deren Schwingbreiten und/oder der Belastungen (Traglast oder Stabilitätslast) erfolgt so, daß der weitere Einsatz der Komponenten zweifelsfrei auch ohne weitere Prüfungen und Nachweise möglich ist.

#### 9.2.3 Stufe C

Die der Betriebsstufe C zuzuordnenden Störfälle sind dadurch gekennzeichnet, daß nach ihrem Auftreten ein Abfahren der Anlage erforderlich ist.

Die Beanspruchungsgrenzen der Stufe C erlauben plastische Deformation insbesondere im Bereich von geometrischen Diskontinuitäten. Es ist nachzuweisen, daß die möglichen Verzerrungen ohne

Versagen (Bruch oder Funktionsverlust) aufgenommen werden können. Nach Auftreten eines solchen Falles kann eine Inspektion der betroffenen Komponenten erforderlich werden. Der Kriech- Ermüdungsanteil dieser Belastungen ist mitauszuweisen.

#### 9.2.4 Stufe D

Die Stufe D darf nur in Schadensfällen in Anspruch genommen werden. Bei der Stufe D sind nur Belastungen, die primäre Spannungen bewirken, zu berücksichtigen. Dabei wird in Kauf genommen, daß bei Auftreten dieser Belastung in größeren Bereichen plastische Verformungen auftreten können.

### 9.3 Belastungen

Alle ermittelten oder hinreichend konservativ festgelegten mechanischen, thermischen, umgebungsbedingten (Korrosion, Strahlung) Belastungen sind der Auslegung, Konstruktion und Berechnung zugrunde zu legen.

Unter Belastung ist die Einwirkung von zuvor definierten Lastfällen auf die Komponenten zu verstehen. Sie ruft in den Komponenten Beanspruchungen (Spannungen und Dehnungen) hervor, für welche die Komponenten entsprechend den Beanspruchungsstufen auszulegen sind.

#### 9.3.1 Mechanische Belastungen

Die aus mechanischen Belastungen erzeugten Spannungen und Dehnungen sind im Rahmen der allgemeinen Analyse des mechanischen Verhaltens zu ermitteln und fallweise zu beurteilen.

Die mechanischen Belastungen hochtemperaturbeaufschlagter Bauteile (wie z. B. Wärmetauscherrohre, heißer zylindrischer Sammler, Spaltrohre eines Röhrenspaltofens) sind durch die Differenz der unterschiedlichen Drücke benachbarter Kreisläufe geprägt. Dieser Differenzdruck ist auch unter Einbeziehung von Meßunsicherheiten und Regelschwankungen bei Normalbetrieb sehr gering. Im Falle der geplanten Nuklearen Prozeßwärme-Anlage sind dies beispielsweise 3 bar. Die aufgrund der Bauteilabmessungen



auftretenden geringen Primärspannungen wirken sich positiv auf die Ausnutzung der verfügbaren Zeitstandfestigkeit und die Vermeidung einer möglichen Bauteilschädigung durch Ratcheting aus.

Im Falle des unterstellten Störfalls "Bruch der Zwischenkreislauf- bzw. Prozeßgasleitung" steht für einen begrenzten Zeitraum der volle Systemdruck als Außendruck an. Zylindrische Bauteile größerer Abmessung sind deshalb gegen die Versagensart Kriechbeulen abzusichern.

Eigengewicht ist als Belastung dickwandiger Bauteile häufig von untergeordneter Bedeutung. Im Falle der Wärmetauscherrohre ist jedoch in Abhängigkeit von der jeweiligen Rohrleitungsführung (Geradrohr oder Wendelrohr) im Hinblick auf die dabei induzierten Biegebeanspruchungen das Eigengewicht zu berücksichtigen.

Strukturteile zur Halterung und Abstützung erfahren neben dem Eigengewicht auch Belastungen durch Gewichtskräfte, die aus ihrer Funktion als Lastabtragung und durch aufgeprägte Kräfte aus behinderter Wärmedehnung resultieren.

#### 9.3.2 Thermische Belastungen und thermisch induzierte Beanspruchungen

Thermische Belastungen ergeben sich kühlmittelbedingt einerseits durch das Temperaturniveau, andererseits durch Temperaturänderungen.

Das Temperaturniveau stellt eine thermische Belastung dar, die durch das entsprechende temperaturabhängige Werkstoffverhalten über die jeweiligen maßgeblichen Festigkeitskennwerte zu berücksichtigen ist.

Bedingt durch die Wärmeübergangsbedingungen des gasförmigen Kühlmittels sowie der geringen Temperaturdifferenzen zwischen Primär- und Sekundärkreis sind die zu erwartenden Temperaturgradienten unter stationärer Bedingung in den jeweiligen Bauteilen ebenfalls gering. So weisen die Planungsdaten einer Nuklearen

Prozeßwärmanlage für die angestrebten Temperaturtransienten als Temperaturänderungsgeschwindigkeit  $\dot{T}$  und Temperaturhub  $T_h$  bei charakteristischen Betriebszuständen aus:

- Anfahren  $\dot{T} = 1 \text{ K min}^{-1}$   $T_h = 650 \text{ K}$
- Abfahren  $\dot{T} = 2 \text{ K min}^{-1}$   $T_h = 650 \text{ K}$

Es ist erkennbar, daß für die Bauteile eine schonende Fahrweise angestrebt wird. Kennzeichnendes Merkmal dieser schonenden Fahrweise sind sehr geringe Transienten im Fall größerer Temperaturhübe sowie geringere Temperaturhübe bei entsprechend größeren Transienten im Falle eines anomalen Betriebszustandes oder bei Störfällen.

Neben den spezifischen An- und Abfahrtransienten muß bei der Bauteilabsicherung auch eine mögliche oberflächennahe Beanspruchung aufgrund von stationären Heißgasstrahlen oder hochfrequenten Temperaturwechseln diskutiert werden. Wegen der dabei auftretenden starken Relaxation ist diesen Beanspruchungen - insbesondere im Zusammenhang mit vorhandenen Primärspannungen - besondere Bedeutung beizumessen. Derartige Belastungen sind im Hinblick auf ein mögliches Kriech-Ermüdungsversagen und Kriechratcheting zu beurteilen.

### 9.3.3 Umgebungsbedingte Belastungen

Korrosive gasförmige Medien (primäres, verunreinigtes HTR-Helium, konditioniertes Zwischenkreislaufhelium, Prozeßgase) können die mechanischen Eigenschaften von Hochtemperaturlegierungen durch chemische Reaktionen mit den Legierungsbestandteilen beeinflussen.

Aus den bisher vorliegenden Zeitstandkennwerten aus Versuchen mit Laufzeiten bis 25.000 h, die in Luft, HTR-Helium und Prozeßgas gemessen wurden, ist zu erwarten, daß die Zeitstandeigenschaften in einem gemeinsamen Streuband liegen (Kapitel 3.2.3, Abb. 3.3).

Als weitere Belastungen von Hochtemperaturreaktorkomponenten sind thermische und schnelle Neutronen zu berücksichtigen. Im Falle der NPW-Anlage liegen die Erwartungswerte (Eintrittsbereich der Komponenten) jedoch sehr gering:

- schnelle Fluenz unter  $5,5 \times 10^{13}$  Neutronen pro Quadrat-zentimeter
- thermische Fluenz unter  $4,5 \times 10^{15}$  Neutronen pro Quadrat-zentimeter

Bei diesen Werten werden keine Änderungen der Werkstoffeigenschaften erwartet.

Fazit:

Die Einteilung der Lastfälle und Beanspruchungsstufen für Komponenten erfolgt in Anlehnung an KTA 3201.2. Dabei wird den HTR-spezifischen Bedingungen Rechnung getragen. Für die Auslegung, Konstruktion und Berechnung sind alle mechanischen, thermischen und umgebungsbedingten Belastungen zu berücksichtigen.

Bei normalem Betrieb sind wegen der geringen Druckdifferenzen der Gase auf Primär- und Sekundärseite die Primärspannungen sehr niedrig. Unter thermischer Belastung wird der Einfluß der Betriebstemperatur auf die Gefügeänderung der Werkstoffe und damit auf deren Kennwerte erfaßt. Die chemische Einwirkung der Arbeitsgase bei den hohen Temperaturen in Form von Oxidation, innerer Oxidation, Auf- bzw. Entkohlungsreaktion muß insbesondere im Temperaturbereich oberhalb 900 °C ausreichend berücksichtigt werden. Für die wärmetauschenden Komponenten ist der Einfluß von Neutronenstrahlung auf die Werkstoffeigenschaften vernachlässigbar.

Literatur zu Kapitel 9:

- /1/ J. M. Corum, W. C. Greenstreet, K. C. Liu, C. E. Pugh,  
R. W. Swindeman:  
Interim Guidelines for Detailed Inelastic Analysis of High  
Temperature Reactor System Components  
ORNL-5014, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 1974
- /2/ S. S. Manson, G. R. Halford, M. H. Hirschberg:  
Creep-Fatigue Analysis by Strain Range Partitioning  
ASME First National Congress on Pressure Vessel and Piping,  
San Francisco, 1971
- /3/ M. C. M. Liu, E. Krempl:  
Uniaxial Viscoplasticity Based on Total Strain and Overstress  
J. Mech. Physics of Solids, 1979

## 10. Versagensarten und Auslegungsgrenzen

### 10.1 Versagensarten

Die metallischen Werkstoffe, die für die Herstellung der Komponenten vorgesehen sind, weisen im Hochtemperaturbereich ein zeitabhängiges Festigkeitsverhalten auf. Aus diesem Grunde sind bei der Auslegung der Komponenten neben den zeitunabhängigen die zeitabhängigen Versagensarten zu diskutieren.

Die Regelwerke für die Komponentenauslegung von Leichtwasserreaktoren beschränken sich bei der Beurteilung von Versagensarten auf zeitunabhängiges Festigkeitsverhalten. Alle hierbei auftretenden Versagensarten sowie die hochtemperaturspezifischen Versagensarten, letztere sind durch Unterstreichen gekennzeichnet, werden im ASME-CC N 47 behandelt:

- (1) Duktiler Bruch infolge kurzzeitiger Belastung
- (2) Spröder Bruch infolge kurzzeitiger Belastung
- (3) Kriechbruch unter langzeitiger Belastung
- (4) Kriech-Ermüdungs-Versagen infolge Belastungswechsel
- (5) Stabilitätsverlust infolge kurzzeitiger Belastung
- (6) Kriechbedingter Stabilitätsverlust infolge langzeitiger Belastung
- (7) Übermäßige Verformung infolge Kriechratcheting
- (8) Verlust der Funktionstüchtigkeit infolge großer Verformungen
- (9) Umgebungsbedingtes Versagen.

Bei der Auslegung im Niedertemperaturbereich wird der zyklische Anstieg bleibender Dehnungen (= Ratcheting) nicht zugelassen. Im Hochtemperaturbereich ist das Anwachsen bleibender Dehnungen unter stationärer Belastung durch Kriechen und unter zyklischen Belastungen durch Kriech-Ratcheting unvermeidbar. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Auslegung im Hochtemperaturbereich neben den Versagensarten mit den bekannten Erscheinungs-

formen Bruch, nämlich (1), (2), (3) und (4), oder Stabilitätsverlust (5) und (6), auch solche mit der Erscheinungsform unzulässige Verformung (7) und (8), zu betrachten.

Dem Versagen infolge Korrosion, Verzunderung, Aufkohlung u. ä. ist durch geeignete metallurgische oder andere Ersatzmaßnahmen zu begegnen. Sofern Korrosionsvorgänge eine Beeinträchtigung der Materialeigenschaften in oberflächennahen Bereichen bewirken, sollen Waddickenzuschläge vorgesehen werden, deren Maß im Einzelfall festzulegen ist.

Im übrigen können die vielfältigen möglichen Maßnahmen zur Verhinderung korrosiven Angriffs heute noch nicht Gegenstand einer Regel sein.

## 10.2 Versagensbezogene Grenzwerte

Bereits aus der Praxis der Komponentenauslegung nach konventionellen Regeln ist bekannt, daß sich nicht alle möglichen Versagensformen durch die Einhaltung eines einzigen Grenzwertes, d. h. vor allem einer zulässigen Spannung, ausschließen lassen. Beispielsweise ist es allgemein üblich, neben der Auslegung gegen Gewaltbruch durch Einhaltung eines Spannungsgrenzwertes zusätzlich auch dem Beulen oder Knicken durch Anwendung spezifischer Kriterien vorzubeugen; zudem beinhaltet TRD 301 ein Verfahren zur Begrenzung der Kriech-Ermüdungsausnutzung.

Im ASME-Code, Section III, Div. 1 wurde erstmals für den kerntechnischen Bereich ein konsistentes System von Grenzwerten festgelegt, durch dessen Anwendung bei der Komponenten-Auslegung allen Versagensformen des Niedertemperaturbereiches begegnet wird. Dieses System ist im ASME-CC N 47 um die Versagensformen des Hochtemperaturbereiches konsequent erweitert.

Der Fachkreis ist zu dem Ergebnis gekommen, daß das Prinzip der Absicherung gegen die einzelnen Versagensarten durch die Einhaltung jeweils entsprechender Grenzwerte aus dem ASME-CC N 47 für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C übernommen werden kann,

daß aber einzelne Grenzwerte modifiziert und neu gefaßt werden müssen; Einzelheiten enthalten die folgenden Abschnitte.

Um den Ausschluß aller Versagensformen des Hochtemperaturgebietes zu erreichen, müssen folgende Begrenzungen in Betracht gezogen werden:

- Begrenzung der Spannung
- Begrenzung der Dehnung
- Begrenzung der Einsatzzeit
- Begrenzung der Belastungszyklen
- Begrenzung der Verformung
- Begrenzung der Belastung

Wie im ASME-CC N 47 näher dargestellt, werden die Spannungen und Dehnungen je nach erzeugender Ursache und räumlicher Verteilungen in der Komponente in verschiedene Kategorien eingeteilt; Spannungs- und Dehnungsgrenzwerte sind diesen Kategorien zugeordnet.

Für die Bewertung der Beanspruchungen (Spannungen und Dehnungen) werden diese in Membran- (m), Biege- (b) und Spitzenanteile (s) unterteilt, denen jeweils unterschiedliche Grenzen zugeordnet werden. Bezugswert ist die Größe für Membrananteile.

Ein Grenzwert ist als höchstzulässige Spannung, Dehnung, Einsatzzeit usw. aufzufassen. Er beinhaltet einen Sicherheitsabstand (bzw. Sicherheitsbeiwert) zu der das Bauteilversagen kennzeichnenden entsprechenden Größe. Die Sicherheitsabstände sind bei den verschiedenen Betriebsstufen unterschiedlich groß.

### 10.3 Grenz- bzw. Vergleichswerte

#### 10.3.1 Absicherung gegen Gewalt- und Kriechbruch

Für die Absicherung gegen diese Versagensarten (1) bis (3) finden



- sowohl der zeitunabhängige Spannungsvergleichswert  $S_m$  als auch
- der zeitabhängige Spannungsvergleichswerte  $S_t$

zur Begrenzung der primären Membran- und Biegespannung Verwendung. Diese Vergleichswerte werden werkstoffabhängig aus den Kennwerten des Grundwerkstoffes wie folgt bestimmt:

Der zeitunabhängige Spannungsvergleichswert  $S_m$  ist der kleinste der folgenden vier Werte:

- (1) ein Drittel des Mindestwertes für die Zugfestigkeit bei Raumtemperatur
- (2)  $1/2,7$  des Mindestwertes für die Zugfestigkeit bei Betriebstemperatur
- (3) zwei Drittel des Mindestwertes für die Streck- bzw. 0,2 %-Dehngrenze bei Raumtemperatur
- (4) 90 % des Mindestwertes für die Streck- bzw. 0,2 %-Dehngrenze bei Betriebstemperatur.

Diese Kriterien sind anwendbar auf die in Kap. 7.1 genannten Werkstoffe, wobei die Festigkeitswerte bei Betriebstemperatur mit einer betriebsrelevanten Dehngeschwindigkeit zu ermitteln sind.

Der zeitabhängige Spannungsvergleichswert  $S_t$  ist der kleinste der folgenden Werte:

- (1) zwei Drittel des Mindestwertes der Zeitstandfestigkeit für die Zeit  $t$ ,
- (2) der Mindestwert der 1 %-Zeitdehngrenze für die Zeit  $t$ .

Diese Kriterien sind auf den genannten Werkstoffe anwendbar:

X 10 NiCrTiAl 32 20, NiCr 22 Co 12 Mo, NiCr 22 Fe 18 Mo sowie NIMONIC 86. Eine Bewertung der Zeitstandfestigkeitsdaten der vorgenannten Werkstoffe hat gezeigt, daß die Anwendung des oben definierten Spannungsvergleichswertes  $S_t$  eine ausreichend Absicherung bei der Komponentenauslegung gewährleistet.

Die Begrenzung der Primärspannung auf einen Vergleichswert  $S_t$  ist dann sinnvoll und nicht zu konservativ, wenn die Belastung im wesentlichen zeitlich konstant bei konstanter Temperatur ansteht. Variieren Lasten und Temperaturen zeitlich signifikant, so wird die Primärspannung in Form des Primärspannungs-Ausnutzungsgrades  $U_p$  begrenzt:

$$U_p = \sum_i \frac{t_i}{t_{io}} \leq 1,0$$

Hierbei sind  $t_i \hat{=}$  die gesamte Wirkungsdauer eines bestimmten Primärspannungsniveaus bei einer bestimmten Temperatur während der Betriebszeit der Komponente.

$t_{io} \hat{=}$  die zulässige Betriebszeit für die entsprechende Spannungszeit-Kombination, wenn sie allein wirksam wäre.

Kaltverformte Werkstoffzustände und Schweißverbindungen sind mit entsprechenden Abschlagfaktoren auf die Spannungsvergleichswerte zu beurteilen.

Für die Stufung der Sicherheitsbeiwerte bei den verschiedenen Spannungsarten und Lastfallkategorien liefert der ASME-CC N 47 eine geeignete Richtsschnur.

### 10.3.2 Absicherung gegen Ratcheting/ Kriechratcheting

Der ASME-CC N 47 bietet eine Reihe von Möglichkeiten, Ratcheting durch Einhaltung von Spannungsgrenzwerten zu vermeiden. Diese Grenzwerte haben sich für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C als wenig hilfreich erwiesen, da ihnen die Vorstellung zugrunde liegt, daß das Ratcheting vorwiegend durch Plastifizierungsvorgänge bestimmt und das Kriechen nur als Störeffekt zu behandeln ist.

Im Temperaturbereich oberhalb 800 °C treten jedoch Plastifizierungsvorgänge in den Hintergrund, während das Kriechen zum bestimmenden Faktor wird. Wenn Dehnungszyklen nun bei sehr hohen

Temperaturen auftreten, entsteht Kriechratcheting aufgrund der Relaxation von Eigenspannungen, wobei eine erhebliche Vergrößerung der Kriechgeschwindigkeit, verglichen mit der durch die Primärspannung allein hervorgerufenen, rechnerisch erwartet wird.

Diese Dehnungen infolge Kriechratchetings sowie die Dehnungen infolge der stationären Belastungen werden gemäß ASME-CC N 47 für den Grundwerkstoff begrenzt:

$$\begin{aligned}\epsilon_m &= 1 \% \quad (\text{Membrandehnung}) \\ \epsilon_b + \epsilon_m &= 2 \% \quad (\text{Membran- und Biegedehnung}) \\ \epsilon_s + \epsilon_b + \epsilon_m &= 5 \% \quad (\text{lokale Gesamtdehnung}).\end{aligned}$$

Da es sich bei den Kriechratcheting-Dehnungen um Größen handelt, die sich aus einer Summation von Inkrementen über der Zeit ergeben, ist eine Stufung der o.g. Grenzwerte und Zuordnung zu Betriebsstufen nicht sinnvoll.

Für den Schweißnahtbereich sind entsprechend ASME-CC N 47, die mit dem Werkstoffverhalten für den Grundwerkstoff ermittelten Dehnungen auf 50 % der für den Grundwerkstoff zulässigen Dehnungen zu begrenzen. Für das vorgesehene Regelwerk ist dieses Vorgehen zu überprüfen. Hierzu sind gezielte experimentelle Untersuchungen, die auch die Beurteilung des Kriech-Ermüdungs-Verhaltens von Schweißverbindungen beinhalten, in den laufenden Versuchsprogrammen vorgesehen.

### 10.3.3 Absicherung gegen Ermüdung/ Kriechermüdung

Die Grenzwerte dieses Abschnitts zielen darauf, die systematische Bildung von Ermüdungsanrissen auszuschließen. Bezüglich dieser Versagensarten gefährdet sind Positionen am Bauteil, an denen als Folge geometrischer Unstetigkeiten oder starker Temperaturgradienten konzentrierte Spannungen/Dehnungen sich einstellen und diese im Laufe der Einsatzzeit zyklisch wechseln. Daher sind die lokalen Spannungs-/Dehnungs-Spitzen geeignet zu begrenzen.

Wie in Kapitel 8 vorgeschlagen, ist die kombinierte Kriech- und Ermüdungserschöpfung entsprechend dem im ASME-CC N 47 angegebenen Verfahren zu begrenzen. Hierbei erfolgt eine getrennte Ermittlung der Werkstoffausnutzung infolge Belastungswechsel  $U_E$  (Ermüdung) sowie infolge Belastungshaltezeiten  $U_K$  (Kriechen). Die Summe beider Ausnutzungsanteile darf einen werkstoffabhängigen Kriech-Ermüdungs-Erschöpfungsgrad  $D$  nicht überschreiten.

$$U_E + U_K \leq D$$

Zur Anwendung dieses Beurteilungsverfahrens sind Auslegungskurven für die Ermüdungs- und Zeitstandbeurteilung sowie für die zulässige Kriech-Ermüdungs-Erschöpfung erforderlich.

Die Auslegungskurve für die Ermüdungsbeurteilung wird aus Mittelwertkurven für die Wechselfestigkeit des Grundwerkstoffes dadurch gewonnen, daß Sicherheitsabstände in die Dehnungsamplitude bzw. die Lastwechselanzahl bis zum Bruch eingebracht werden. Die im folgenden angegebenen Sicherheitsabstände haben sich bereits bei niedrigen Temperaturen bewährt. Sie sollen deshalb auch zunächst im Bereich hoher Temperaturen Anwendung finden:

$$\begin{aligned} \nu &= 2 \text{ gegen die Dehnungsamplitude bzw.} \\ \nu &= 20 \text{ gegen die Lastwechselanzahl.} \end{aligned}$$

Für jede Zyklenzahl  $N$  wird derjenige Sicherheitsbeiwert gewählt, der die niedrigere Dehnungsamplitude liefert.

Die Auslegungskurve für die Zeitstandausnutzung basiert auf der Mindestwertkurve für die Zeitstandfestigkeit der Grundwerkstoffe, reduziert um einen Abschlag in der Spannung. Mit einem Erhöhungsfaktor von 11 % in der Spannung werden bei den im ASME-CC N 47 genannten Werkstoffen nicht nachzuweisende Zeitsicherheiten von 2 als Arbeitshypothese erreicht. Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, im Bereich hoher Temperaturen folgende Sicherheitsabstände zu benutzen:

- $\nu = 1,11$  gegen die Spannung bzw.  
 $\nu = 2,0$  gegen die Bruchzeit.

Eine ausreichende Belegung der Ergebnisse aus kombinierten Kriech-Ermüdungs-Versuchen ist für die verschiedenen Werkstoffe noch nicht gegeben. Aus diesem Grunde sind gegenwärtig noch keine belastbaren Angaben für die werkstoffabhängigen Ausnutzungsgrade verfügbar. Eine Bestimmung der Größe  $D$  als Funktion und  $U_E$  und  $U_K$  erfolgt im Rahmen noch laufender Werkstoffuntersuchungen, die auch das Ermüdungsverhalten von Schweißnähten einbeziehen.

Die Einzelausnutzungsgrade  $U_E$  und  $U_K$  werden für die gesamte Belastungsgeschichte wie folgt ermittelt:

$$U_E = \sum_j n_j / n_{jo} \leq 1,0$$

Hierbei sind  $n_j$  = Anzahl der vorgesehenen Lastwechsel mit dem Dehnungsspiel  $\Delta \varepsilon_j$  und  
 $n_{jo}$  = Anzahl der erlaubten Lastwechsel mit dem Dehnungsspiel  $\Delta \varepsilon_j$  entsprechend der Auslegungskurve für die höchste Zyklustemperatur.

$$U_K = \sum_k t_k / t_{ko} \leq 1,0$$

Hierbei sind  $t_k$  = vorgesehene Zeit bei der Spannung  $\sigma_k$  und  
 $t_{ko}$  = erlaubte Zeit bei der Spannung  $\sigma_k$  entsprechend der Auslegungskurve für die Temperatur  $T_k$ .

Der zulässige Kriech-Ermüdungs-Erschöpfungsgrad ist

$$D \leq 1,0$$

#### 10.3.4 Absicherung gegen Beulen, Kriechbeulen

Diese Versagensarten sind in erster Linie bei gekrümmten Schalen unter äußerer Überdruckbelastung zu betrachten.

Bei sehr kurzzeitig wirkenden Belastungen ist auch im Hochtemperaturgebiet eine Absicherung gegen spontanes Beulen durch Überschreiten einer Verzweigungslast bei rein elastischem Beulen oder Überschreiten einer Traglast bei elastoplastischem Beulen vorzunehmen. Im letzteren Fall spielt die Abweichung von der idealen Geometrie - z. B. die Anfangsovalität eines Rohres - sowie eine aus Kurzzeitkennwerten des Materials gebildete zulässige Spannung eine bestimmende Rolle. Die Regeln AD-B6, TRD 306 und KTA 3201.2 beinhalten geeignete Vorschriften über die Nachweismethodik und eine geeignete Definition von Grenzwerten bezogen auf die zeitunabhängigen Spannungskennwerte  $1,0 \times S_m$  zur Absicherung gegen diese Versagensart.

In Anknüpfung an KTA 3201.2 - Anhang A - wird, entgegen den dort angegebenen Berechnungsverfahren, die Wahl folgender Sicherheitsfaktoren zur Bestimmung der zulässigen Beullast vorgeschlagen:

Betriebsstufe	Sicherheitsfaktor gegen	
	elastisches Beulen	plastisches Beulen
	$f_K$	$f_V$
A	3,0	1,2
B	3,0	1,2
C	2,5	1,1
D	1,5	1,0

Der Sicherheitsfaktor  $f_v$  ist als zusätzliche Sicherheit zu werten, da bereits in der aus Traglastüberlegungen abgeleiteten zulässigen Spannung Sicherheiten enthalten sind.

Die für den Hochtemperaturbereich spezifische Versagensart in diesem Zusammenhang ist das Kriechbeulen. Sie ist zu betrachten und durch konstruktive oder betriebliche Maßnahmen auszuschließen, wenn über definierte Zeiträume Beullasten bei hohen Temperaturen anstehen. Da das Versagen in Form einer progressiven Vergrößerung der Formabweichung - z. B. Ovalität - über der Zeit bis hin zum Kollaps auftritt, erscheint es sinnvoll, primär die Belastungszeit, d. h. die Zeit des Anstehens der Beullast bei hoher Temperatur, zu begrenzen.

Vorerst wird vorgeschlagen, einen Sicherheitsfaktor von 10 als Verhältnis der Zeit vom Belastungsbeginn bis zum Kollaps und der tatsächlichen Belastungszeit unabhängig von der Betriebsstufe einzuhalten. Es wird jedoch für notwendig angesehen, aufgrund theoretischer und laufender experimenteller Untersuchungen eine verfeinerte und weniger konservative Begrenzung der Belastungszeit zu definieren.

Unter Betrachtung des Kriechverhaltens der Werkstoffe kann es für die Komponenten-Auslegung zweckmäßig sein, aus der ZeitSicherheit eine Beullast-Sicherheit abzuleiten.

Ein zum Beulen von Schalen völlig analoger Vorgang ist das Knicken von Stäben - z. B. von Rohren unter Längsdruckbelastung.

Daher gelten alle bisher zum Beulen gemachten Aussagen analog.

Stab-Längskräfte können verschiebungskontrolliert sein. Im Fall des rein elastischen Knickens unter Kurzzeitbelastung werden folgende Sicherheitsfaktoren als Verhältnis der Verschiebung am Verzweigungspunkt vorgeschlagen:

Betriebsstufe	Sicherheit bzgl. der Verschiebung
A	1,67
B	1,67
C	1,4
D	1,1

#### 10.3.5 Absicherung gegen übermäßige Verformung

Die Verwendung der 1%-Zeitdehngrenze in Abschnitt 10.3.1 und die Grenzwertdefinition in Abschnitt 10.3.3 stellt eine Begrenzung der inelastischen Membrandehnung in einer tragenden Bauteil-Wandung auf 1 % und damit eine Begrenzung der Bauteildeformation sicher.

Die aus der Integration der zulässigen Dehnungen sich ergebende Deformation kann jedoch aus Gründen der Funktionserfüllung zu groß sein. In diesem Fall sind die auf die Bauteilfunktion zugeschnittenen Verformungsgrenzen zu spezifizieren, deren Quantifizierung naturgemäß nicht Gegenstand einer Regel sein kann.



Fazit:

In Anlehnung an den ASME-CC N 47 werden Auslegungsrichtlinien gegen die verschiedenen Versagensarten festgelegt. Die Primärspannungen sind gegen die aus dem Zeitstandverhalten abgeleiteten Kennwerte abzusichern. Bei Verzweigungsproblemen richtet sich die Größe der Belastbarkeit bei belastungskontrollierten Vorgängen nach der Verzweigungslast, bei verformungskontrollierten Vorgängen nach der Dehnung bei der Verzweigungsbelastung. Es wird vorgeschlagen, Sicherheitsabstände entsprechend ASME-CC N 47 zu übernehmen. Bei Traglastproblemen wird angestrebt, die erforderlichen Sicherheitsabstände gegen zeitabhängige/ zeitunabhängige Traglast gegenüber ASME-CC N 47 neu festzulegen und experimentell abzusichern. Die Auslegung gegen Ermüdung erfolgt anhand von aus Ermüdungsversuchen abgeleiteten Auslegungskurven. Die Vorgehensweise zur Bewertung von Schweißnähten wird nach Vorliegen der Versuchsergebnisse an Schweißverbindungen kritisch zu überprüfen sein.

Dokumentationen zu Kapitel 10:

- |   |  |                    |
|---|--|--------------------|
| - | Zeitdehngrenzen und Zeitsicherheiten<br>gegen Bruch  | HRB;<br>Diehl      |
| - | Sicherheitsfaktoren bei außendruck-<br>belasteten zylindrischen Bauteilen<br>im Hochtemperaturbereich  | GHT/IA;<br>Schulze |
| - | Berücksichtigung des Einflusses der<br>Korrosion auf die mechanischen Eigen-<br>schaften von Hochtemperaturlegierun-<br>gen bei der Auslegung von HTR-Kompo-<br>nenten | KFA;<br>Schuster   |

## 11. Komponentenbeurteilung

### 11.1 Gesichtspunkte für die konstruktive Gestaltung

Durch Beachtung konstruktiver Gesichtspunkte können im Vorfeld der Auslegungs- und Dimensionierungsarbeiten für im Temperaturbereich oberhalb 800 °C belastete Komponenten sowohl Erleichterungen für die zu erbringenden positiven Festigkeitsnachweise als auch Voraussetzungen für die spätere Überwachung des Komponentenverhaltens geschaffen werden.

Aus dem Katalog möglicher Maßnahmen seien hier folgende Aspekte genannt:

- Verwendung einfacher Bauformen, wie
  - \* Rohr/Zylinder
  - \* Kegel
  - \* Platte
  - \* Kugel
- Minimierung von Schweißnähten im heißen Bereich sowie Vermeidung von Mischnähten und Schaffung prüfbarer Schweißverbindungen
- Gestaltung und Anordnung von Bauteilen unter Beachtung der Gesichtspunkte guter
  - \* Zugänglichkeit
  - \* Inspizierbarkeit
  - \* Ausbaubarkeit und
  - \* wiederkehrender Prüfbarkeit
- Anordnung der Lastabtragungen im Bereich niedriger Temperaturen
- Wärmespannungs- und wärmedehnungsfreundliche Gestaltung durch Vermeidung
  - \* dickwandiger Bauteile
  - \* von Wanddickensprüngen. Im Falle geometrischer

Diskontinuitäten ist auf die Erhaltung von Abklinglängen zu achten.

- \* direkter Anbindung von Bauteilen mit unterschiedlichen Betriebstemperaturen. Statt dessen Ausführung von "thermal sleeves".
- \* der Behinderung von Wärmedehnungen
- \* betrieblich erforderlicher Vorspannungen.

## 11.2 Erfordernisse für die festigkeitsmäßige Beurteilung

Die festigkeitsmäßige Beurteilung von Komponenten und Bauteilen mit sicherheitstechnischer Funktion ist ein Element qualitätssichernder Maßnahmen. Zu einer umfassenden Komponentenbeurteilung gehören neben der rechnerischen Nachweisführung an fehlerfreien Bauteilen auch die bruchmechanische Absicherung gegen unterstellte oder vorhandene Fehler als flankierende Maßnahme (s. Abschnitt 11.5) sowie das Konzept der betrieblichen Überwachung.

Der Umfang anzuwendender qualitätssichernder Maßnahmen orientiert sich dabei an den Schutzzielen sowie an dem Schadenspotential bei einem Versagen der betreffenden Komponente. Der Prozeß der Komponentenbeurteilung vollzieht sich in folgenden Schritten:

1. Auswahl hochbeanspruchter Bauteile unter Einbeziehung der spezifischen Sicherheitsfunktion
2. Erstellung eines kompletten Belastungshistogramms mit Erfassung von anomalen Betriebszuständen und Störfällen (siehe Kapitel 9)
3. Analyse und Beurteilung der Komponenten hinsichtlich möglicher Versagensarten (siehe Kapitel 10).

Voraussetzung für die Durchführung dieses Schrittes ist

- die ausreichende Kenntnis des Werkstoffverhaltens mit besonderer Berücksichtigung HTR-spezifischer Aspekte wie z. B. zeitabhängiges Materialverhalten, Einfluß des Kühlmediums, etc.

- die vorhandene Beurteilungsbasis in Form methodischer Vorgehensweisen (z. B. lineare Schadensakkumulationshypothese zur Kriech-Ermüdungs-Beurteilung; vereinfachte inelastische Nachweisführung) in Verbindung mit festgelegten Sicherheitsfaktoren und daraus abgeleiteten Bemessungsgrenzwerten (siehe Kapitel 10).

Der Detaillierungsgrad eines rechnerischen Nachweises muß sich an der sicherheitstechnischen Bedeutung und kann sich gegebenenfalls auch an der Zugänglichkeit bzw. an der Austauschbarkeit des Bauteils orientieren. Dadurch ist eine Wechselwirkung mit dem Umfang und der Realisierung des vorgesehenen Konzeptes für die betriebliche Überwachung gegeben.

Die Frage des Aufwandes und des Detaillierungsgrades der Nachweisführung stellt sich besonders im Hochtemperaturbereich, wo die Werkstoffe ein ausgeprägtes zeitabhängiges Festigkeitsverhalten aufweisen. In den Kapiteln 3 und 7 wird dargelegt, daß die Berechnung dieses zeitabhängigen Werkstoffverhaltens, das sich in Kriechen und Relaxieren äußert, mittels inelastischer Verfahren möglich ist.

### 11.3 Dimensionierung drucktragender Bauteile

#### 11.3.1 Begriff:

Unter Dimensionierung wird die Bemessung eines tragenden Querschnitts in der Weise verstanden, daß die aus einer Dimensionierungs-Last resultierende Primärspannung höchstens eine aus Materialkennwerten abgeleitete zulässige Spannung erreicht. Da die zulässige Spannung von der Temperatur und - sofern zeitabhängige Kennwerte zu berücksichtigen sind - von der Einsatzzeit abhängt, bestimmen drei Größen die Dimensionierung:

- Dimensionierungs-Last
- Dimensionierungs-Temperatur
- Dimensionierungs-Zeit.

Sie werden im folgenden als

### Dimensionierungs-Vorgaben

bezeichnet.

Obwohl die Dimensionierung unter dem Festigkeitsgesichtspunkt erfolgt, müssen die

- Dimensionierung und der
- Festigkeits-/ Lebensdauernachweis

der Komponente als zeitlich und inhaltlich separate Vorgänge behandelt werden. Die Dimensionierung steht am Beginn der Planung der Komponente, der Festigkeits- (ggf. Lebensdauer-) Nachweis begleitet die Komponenten-Abwicklung z. T. bis zur Fertigstellungsfreigabe.

#### 11.3.2 Dimensionierungs-Last

Bei der Dimensionierung einer Komponente werden nur solche äußeren Lasten berücksichtigt, die durch ausreichende Materialquerschnitte von der Komponente ertragen werden. Dies sind in der Regel der innere und äußere Überdruck und - sofern dimensionierungsbestimmend - Gewichts- oder andere äußere Lasten.

Die Dimensionierungsdruckdifferenz ergibt sich aus den nominalen Systemdrücken plus Zuschlägen. Die Zuschläge werden ermittelt mit dem Ziel, Unsicherheiten in der Ermittlung des Nominalwertes, betriebliche Druckschwankungen und lokale Druckunterschiede abzudecken.

Als nominaler Systemdruck ist zunächst der höchste unter stationären Betriebsbedingungen sich einstellende Druck zu nehmen. Besonderheiten werden in Abschnitt 11.3.5 behandelt.

### 11.3.3 Dimensionierungs-Temperatur

Die Dimensionierungs-Temperatur dient zusammen mit der Dimensionierungs-Zeit (s. Abschnitt 11.3.4) der Festlegung der zulässigen Primärspannung. Sie ergibt sich aus der maximalen mittleren stationären Bauteil-Temperatur in Wandmitte plus Zuschläge. Die Zuschläge werden festgelegt mit dem Ziel, Unsicherheiten in der Ermittlung der Wandtemperatur, betriebliche Schwankungen und lokale Temperaturunterschiede abzudecken.

### 11.3.4 Dimensionierungs-Zeit

Im Temperaturbereich mit zeitabhängigen Materialdaten ist die Dimensionierungs-Zeit zur Festlegung der zulässigen Primärspannung zu definieren. In der Regel wird sie der Betriebseinsatzzeit der Komponente gleichgesetzt. Die Betriebseinsatzzeit der Komponente muß nicht mit der Kraftwerkslebensdauer übereinstimmen (z. B. bei NWA-Systemen).

### 11.3.5 Besonderheiten bei der Bestimmung der Dimensionierungs-Vorgaben

Die in den Abschnitten 11.3.2 bis 11.3.4 beschriebenen Dimensionierungs-Vorgaben werden aus den stationären Betriebsverhältnissen der Komponenten abgeleitet. Das Verfahren ist konservativ, um Reserven für mögliche Zusatzanforderungen zu schaffen, die wegen des Planungsstandes zum Zeitpunkt der Komponenten-Dimensionierung noch nicht bekannt sein können.

In wenigen Fällen können störfallbedingt und kurzzeitig Temperatur- und/oder Drucküberschläge über die zuvor beschriebenen Dimensionierungs-Vorgaben hinaus auftreten oder Umkehrungen der Überdruckverhältnisse (innerer/äußerer Überdruck) auftreten. In solchen Fällen ist nachzuprüfen, ob die Dimensionierung mit betrieblichen Vorgaben ausreicht, wobei die Störfalldauer und störfallbedingte Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen sind. Gegebenenfalls werden die Störfallbedingungen dimensionierungsbestimmend. Bei äußerem Überdruck kann außerdem die Versagensart "Beulen" oder "Kriechbeulen" dimensionierungsbestimmend werden.

Es ist denkbar, daß das oben angegebene Verfahren der Festlegung der Dimensionierungs-Vorgabe zu konservativ erscheint, weil wesentliche Zeitanteile der Komponenten-Einsatzdauer mit niedrigen Temperaturen und/oder Drücken auftreten. Soll diese Konservativität vermieden werden und liegen zum Zeitpunkt der Dimensionierung ausreichende Informationen über die zeitlichen Temperatur- und Druckverläufe vor, so kann aus einer Hypothese über die Akkumulation der Zeitstandschädigung eine die unterschiedlichen Betriebsverhältnisse erfassende äquivalente Dimensionierungs-Zeit abgeleitet werden.

#### 11.4 Berechnung

Für die Versagensarten Kriechratcheting, Kriechbeulen und Kriechermüdung wurden Berechnungen durchgeführt, mit dem Ziel, die Auswirkung dieser Versagensarten auf die Auslegung und für die Bestimmung der zulässigen Betriebszeit abschätzen zu können.

Neben diesen inelastischen Berechnungen wird in Kapitel 11.4.4 ein kurzer Überblick über den derzeitigen Stand der Anwendbarkeit vereinfachter Berechnungsmodelle gegeben.

##### 11.4.1 Kriechratcheting

Als "Ratcheting" wird eine fortschreitende bleibende Verformung und damit eine mögliche Versagensart bei Kombination von Primär- und zyklisch wechselnden Sekundärspannungen bezeichnet. Abhängig vom vorliegenden Spannungsniveau, vom Temperaturniveau und vom Kriechverhalten des Werkstoffs kann eine kurzzeitige plastische Verformung oder Kriechverformung (Kriechratcheting) auftreten.

Die Beziehung zwischen Primär- und Sekundärspannung zur Vermeidung des plastischen Ratchetings wurde am Beispiel des Dreistabmodells abgeleitet. Ergänzend wurde auch Kriechratcheting behandelt, wobei deutlich wird, daß infolge Spannungsabbaus durch Relaxation das Kriterium für plastisches Ratcheting nicht mehr herangezogen werden kann. In einem Zahlenbeispiel wird gezeigt, daß eine überlagerte zyklische Sekundärbeanspruchung gegenüber der reinen Primärspannung zu einer höheren Kriechdehnung durch Kriechratcheting führt.



Als Auslegungsregeln gegen Ratcheting nennt der ASME-CC N 47 vier Tests, die für zeitunabhängiges, elastisch-ideal plastisches Werkstoffverhalten abgeleitet wurden. Dabei kann lediglich Test 1 zur Absicherung einer Komponente gegen Kriechratcheting infolge Transienten im Hochtemperaturbereich verwendet werden (siehe Abschnitt 11.4.4).

Für den Werkstoff NiCr 22 Co 12 Mo und eine Temperatur von 950 °C bedeutet die Anforderung des Tests 1, daß die Gesamtspannung kleiner als  $12 \text{ Nmm}^{-2}$  sein muß. Zur Überprüfung dieser Testanforderung, die für Hochtemperaturkomponenten sehr restriktiv ist, wurden Berechnungen des Kriechratchetingverhaltens einer Rohrkomponente durchgeführt. Die Rechenergebnisse haben gezeigt, daß die Spannungsgrenze dieser Tests überschritten werden kann. Die Lastwechselzahl wird in diesem Test nicht berücksichtigt.

Aufgrund der starken Relaxation bei dehnungskontrollierten Vorgängen erscheint es nicht sinnvoll, der Vorgehensweise des ASME-CC, N 47 wegen der restriktiven Forderung, die Summe aus Primär- und Sekundärspannung durch einen zeitabhängigen Spannungsvergleichswert abzusichern, zu folgen.

Die vorliegenden Rechenergebnisse, die modellartigen Charakter haben, lassen die Notwendigkeit der Begrenzung von Temperaturtransienten sowie die Vermeidung stark ausgebildeter Temperaturdifferenzen über die Bauteilwand erkennen.

In Bauteilversuchen ist anhand von einfachen, jedoch absichernden Belastungszyklen nachzuprüfen, wie genau die Modellrechnungen das Kriechratchetingsproblem beschreiben. Ziel dieser Versuche und Rechnungen soll sein, einfache Regeln zu finden, auf deren Basis Komponenten ausreichend vor zu hohen Dehnungen infolge Kriechratcheting geschützt werden können, ohne durch zu konservatives Vorgehen ein vorhandenes Werkstoffpotential ungenutzt zu lassen.

#### 11.4.2 Kriechbeulen

In Kapitel 10 wurde darauf hingewiesen, daß unter gewissen Störfallannahmen für zylindrische Abmessungen, wie sie beispielsweise

beim Heißgassammler vorliegen, die Notwendigkeit der Absicherung gegen die mögliche Versagensart "Kriechbeulen" besteht. Folgende Einflüsse

- Anfangsovalität
- verändertes Kriechverhalten des Werkstoffs
- zeitliche Temperaturänderung

wurden hinsichtlich eines möglichen Instabilitätsversagens untersucht.

Die gewählte Vorgehensweise zur Kriechbeulabsicherung ist gekennzeichnet durch die Anwendung

- der Norton'schen Beziehung zur Beschreibung des Kriechverhaltens;
- der Hoff'schen Sandwich-Methode als Modell zur Beschreibung des Beulvorganges;
- eines lastbezogenen Sicherheitsfaktors von 1,5 analog der im ASME-CC N 47 empfohlenen Vorgehensweise.

Die Ergebnisse lassen deutlich erkennen, daß eine Absicherung des Bauteils möglich ist, wobei dem Einfluß der zeitlich abnehmenden Temperatur hinsichtlich der zeitlichen Verringerung der Ovalitätszunahme eine besondere Bedeutung zukommt.

Zur Absicherung des methodischen Vorgehens und zur Bestimmung des noch zu erwartenden Sicherheitspotentials des Heißen Sammlers der geplanten Nuklearen Prozeßwärmanlage werden im Rahmen anderer F+E-Programme Kriechbeulversuche durchgeführt.

#### 11.4.3 Kriech-Ermüdungs-Analysen

Ermüdungsanalysen mit angesetzten Transienten von  $\pm 10$  K/min für den Heißen Sammler des Helium/Helium-Wärmetauschers einer Nuklearen Prozeßwärmanlage wurden exemplarisch durchgeführt.

Der Berechnungsablauf und die zugrundegelegte Beurteilungsbasis war hierbei durch folgende wesentliche Merkmale gekennzeichnet:

- Beurteilungstemperatur war - der Forderung des ASME-CC N 47 folgend - die maximale im Zyklus auftretende Temperatur, obwohl rechnerisch ausgewiesen wurde, daß die Temperatur im Zeitpunkt der maximalen Dehnungsschwingbreite deutlich niedriger ist.
- Berücksichtigung von Haltezeiteffekten bezogen auf die mechanischen Haltezeiten bis zu 60 Minuten, wodurch relativ hohe Abminderungsfaktoren in die Ermüdungskurven einbezogen wurden.
- Konservative Verknüpfung positiver und negativer Temperaturtransienten.

Die durchgeführten elastischen Analysen hatten ausschließlich orientierenden Charakter, die ein Gefühl für die Zuverlässigkeit spezifischer Transienten in der genannten Größenordnung vermitteln sollten. Als Ergebnis der Analyse bleibt festzuhalten:

- Ein Festigkeitsnachweis gemäß ASME-CC N 47 wegen Überschätzung der Kriechschädigung mittels elastischer Analysen kann nicht erbracht werden.
- Eine vereinfachte Beurteilungsbasis muß deshalb erarbeitet werden, da die Empfehlungen des ASME-CC N 47, z. B. hinsichtlich der Berücksichtigung von Haltezeiten oder der Festlegung der Bezugstemperatur, zu restriktiv sind. Wegen des starken Temperatureinflusses auf das Materialverhalten wird eine differenziertere Betrachtungsweise mit angemessener Berücksichtigung der Relaxation und des Kriechens erforderlich sein, so daß der Wechselwirkung "Kriechen/Ermüdung" eine wesentliche Bedeutung zukommen wird.

- Eine angemessene komponentenschonende Fahrweise erscheint in jedem Fall geboten. Als Auswirkung dieser Erkenntnisse wurden die maßgeblichen Transienten reduziert (siehe Kapitel 9).
- Es wird empfohlen, die Auswirkungen von Kriech-Ermüdungsbeanspruchungen auf repräsentative Bauteile in den zur Zeit geplanten Versuchen ausreichend zu simulieren. Insbesondere werden seitens der Auslegung Antworten auf die Fragen nach dem Einfluß von
  - \* geringen Transienten eventuell mit Haltezeiten hinsichtlich der damit verbundenen Relaxations- und Kriechvorgänge,
  - \* Transientenfolgen auch unter einer primären Belastung erwartet.

#### 11.4.4 Anwendung vereinfachter Methoden

Eine Nukleare Prozeßwärmanlage weist eine Vielzahl von hochtemperaturbeaufschlagten Bauteilen auf. Um einerseits den Nachweisumfang zu begrenzen, andererseits aber das durch Berücksichtigung des inelastischen Werkstoffverhaltens verfügbare Potential in Bezug auf Anlagenlebensdauer oder Betriebsbelastung weitgehend zu nutzen, ist die Frage nach einer möglichen Anwendung vereinfachter, inelastischer Methoden von besonderer Bedeutung.

Bei Betriebsbelastungen liegen die Beanspruchungen im elastischen Bereich, d. h. der Werkstoff plastifiziert nicht, auch nicht bei Belastungswechseln. Jedoch treten bei diesen Temperaturen beachtenswerte Kriech- und Relaxationserscheinungen auf.

Vereinfachte Methoden zur Komponentenbeurteilung im Hinblick auf Kriechratcheting infolge zyklischer Beanspruchungen werden im ASME-CC N 47 angeboten. Die Anwendbarkeit dieser Methoden für den Hochtemperaturbereich (über 800 °C) wird wie folgt beurteilt:

- Test 1 ist zwar anwendbar, jedoch erlaubt die darin vorgeschriebene Spannungsgrenze nicht die Abtragung der zu erwartenden Belastungen.
- Test 2, 3 und 4 sind nicht anwendbar, da sie auf der Annahme basieren, daß plastische Verformungen zu Eigenspannungen führen, was im gegebenen Fall nicht zutrifft.

Die Ermittlung der Kriech-Ermüdungerschöpfung auf der Basis elastischer Spannungsanalysen nach ASME-CC N 47 ist zwar anwendbar, führt jedoch wegen der Vernachlässigung der Relaxation zu einer restriktiven Lebensdauerbegrenzung.

Weitere vereinfachte Methoden zur Lebensdauerbeurteilung hinsichtlich Kriechratcheting und Kriech-Ermüdungerschöpfung sind zur Zeit nicht verfügbar.

Aus heutiger Sicht sind somit für die Lebensdauerbeurteilung von Komponenten im Hochtemperaturbereich inelastische Analysen erforderlich. Für konkrete Bauteile sind inelastische Analysen sehr aufwendig; deshalb werden folgende Untersuchungen an dem einfachen, jedoch häufig vorkommenden Bauteil "Gerades Rohr der Länge l" vorgeschlagen:

- Erstellung eines Belastbarkeitsdiagramms mittels inelastischer Analysen für anlagengemäße Belastungszyklen
- Auswertung dieser Ergebnisse im Hinblick auf die Bereitstellung vereinfachter Methoden zur Beurteilung der elastisch ermittelten Spannungen
- Bereitstellung von Korrekturfaktoren zur Ergebnisübertragung auf andere Bauteilgeometrien und andere Belastungsarten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen erlauben eine erste Beurteilung der Lebensdauer der Komponente; über eine Modifikation der Vorgehensweise ist nach Vorliegen dieser Ergebnisse zu befinden.

### 11.5 Bruchmechanische Absicherung

Die bruchmechanische Absicherung wird im Rahmen qualitätssichernder Maßnahmen als ein Element einer umfassenden Bauteilanalyse immer dann herangezogen, wenn aufgrund sicherheitstechnischer Anforderungen eine Bewertung fehlerbehafteter Bauteile angezeigt ist.

Die Auswahl der Bauteile, für die bruchmechanische Analysen in Betracht zu ziehen sind, setzt stets eine Analyse über mögliche Versagensarten und Versagensformen voraus, wobei das Ziel von Bruchmechanikanalysen darin liegt, fehlerbehaftete Bauteile auf ihre Integrität über die gesamte Lebensdauer hin zu untersuchen, um während des Betriebes spontanes Versagen durch Bruch auszuschließen.

Während im Niedertemperaturbereich die maßgeblichen Werkstoffeigenschaften als unabhängig von der Einsatzdauer angesetzt werden können, spielen im Hochtemperaturbereich zeitabhängige Prozesse eine wesentliche Rolle, die bei bruchmechanischen Konzepten und deren Anwendung zu berücksichtigen sind. Hierzu zählen insbesondere

- das Kriechen bzw. Relaxieren
- Strukturveränderungen
- Oberflächenveränderungen.

Die zur Zeit für den Niedertemperaturbereich zur Verfügung stehenden Bruchmechanik-Konzepte hinsichtlich einer möglichen Übertragung auf den Hochtemperaturbereich sind diskutiert worden, wobei sich folgendes Bild hinsichtlich der Frage nach einer möglichen Berücksichtigung der oben angesprochenen zeitabhängigen Phänomene ergibt:

Bedingt durch Relaxation von Spannungsüberhöhungen an der Rißspitze sind bei einigen Bruchmechanik-Konzepten wie "Linear-elastische Bruchmechanik", "Crack Opening Displacement (COD)" oder "J-Integral" die Voraussetzung ihrer Anwendung aufgehoben. Am ehesten könnte das Wachstum eines Risses durch Kriechen bzw. Relaxieren durch das " $C^*$ -" oder das "Nettospannungskonzept" berücksichtigt werden. Dabei ist noch zu prüfen, ob diese Konzepte so entwickelt werden können, daß den Gefügeänderungen und den Oberflächenveränderungen Rechnung getragen wird.

Zur Zeit gibt es noch kein Bruchmechanik-Konzept für den Temperaturbereich oberhalb 800 °C, das für ein Regelwerk empfohlen werden könnte.

Auch für die Beurteilung von Komponenten mit Arbeitstemperaturen oberhalb 800 °C werden auf lange Sicht bruchmechanische Analysen für notwendig erachtet. Die Durchführung experimenteller und theoretischer Untersuchungen wird für erforderlich gehalten, um ein Bruchmechanik-Konzept für den hohen Temperaturbereich zu entwickeln, bei dem neben den Kriechvorgängen auch der zeitlich sich ändernde Werkstoffzustand Berücksichtigung findet.

Mit Versuchen an Bauteilen oder bauteilähnlichen Geometrien soll die Übertragbarkeit eines entsprechenden Konzeptes im Hinblick auf eine Bruchmechanik-Analyse sichergestellt werden.

#### 11.6 Betriebliche Überwachung und wiederkehrende Prüfungen

##### 11.6.1 Allgemeine Anforderungen zur Qualitätssicherung

Die wiederkehrenden Prüfungen und die betriebliche Überwachung von Hochtemperaturreaktor-Komponenten mit sicherheitstechnischer Funktion (Primärkreisbarriere) sind Teil der Qualitätssicherung, die aus folgenden Elementen besteht:

1. Funktions-, beanspruchungs-, herstellungs- und prüfgerechte Konstruktion
2. Umfassende Berechnung unter Berücksichtigung aller Lastfälle und ausreichende Kenntnis des Werkstoffverhaltens
3. Qualifizierte Fertigung und Montage
4. Prüfungen während der Herstellung
5. Betriebliche Überwachung der Komponenten
6. Wiederkehrende Prüfung der Komponenten

Der Umfang anzuwendender qualitätssichernder Maßnahmen richtet sich nach den Schutzzielen und nach dem Schadenspotential bei einem Versagen der betreffenden Komponente. Im Vordergrund steht dabei insbesondere die Freisetzung von Spaltprodukten als unmittelbare oder mittelbare Folge eines Versagens der Komponente.

Im einzelnen muß abgewogen werden, in welchem Umfang qualitätssichernde Maßnahmen laut o. g. Auflistung zur Verhinderung oder Eingrenzung möglicher Schäden geeignet sind.

Wiederkehrende Prüfungen sind dann anzuwenden, wenn einerseits ein hohes Schadenspotential beim Versagen einer Komponente gegeben ist und wenn andererseits Vorschädigungen möglich sind. Unsicherheiten bezüglich Vorschädigungen betreffen insbesondere Änderungen des Werkstoffverhaltens sowie das Wachsen von zunächst nicht nachweisbaren, geringfügigen Anrissen, ohne daß dies durch eine laufende betriebliche Überwachung erkannt wird.

Grundsätzlich liegen verschiedene Maßnahmen für wiederkehrende Prüfungen (WKP) vor (Sichtprüfung, Oberflächenrißprüfung, Eindringprüfung, Wirbelstromprüfung, Röntgenprüfung, Ultraschallprüfung), wobei zur Erweiterung des zugänglichen Bereiches optische Hilfsmittel (Endoskope) bzw. elektronische Übergangseinrichtungen (TV-Monitore) verwendet werden.

Eine abschließende Beurteilung der tatsächlich anzuwendenden Maßnahmen kann erst nach genauer Kenntnis der endgültigen Konstruktion, des Werkstoffverhaltens, der detaillierten Störfallanalysen sowie insbesondere der Nachweismöglichkeiten von Fehlern mittels wiederkehrender Prüfungen erfolgen.

#### 11.6.2 Stand der wiederkehrenden Prüfungen bei Leichtwasserreaktoren

Maßnahmen der wiederkehrenden Prüfungen an HTR-Komponenten werden sich an den bei Leichtwasserreaktoren erprobten und in den entsprechenden KTA-Regeln niedergelegten Vorgehensweisen orientieren müssen.



Zur Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen, d. h.

- Ultraschallprüfungen
- Sichtprüfungen
- Magnetpulverprüfungen
- Druckprüfungen

existieren für Leichtwasserreaktoren entsprechende Verfahrensnormen (DIN 24 435, Teil 1 - 5).

#### 11.6.3 Anforderungen an die HTR-Komponenten zur Gewährleistung der Wiederholungsprüfbarkeit

Alle Anlagenteile müssen so beschaffen sein, daß sie entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung und den möglichen Schädigungsmechanismen in hinreichendem Umfang betrieblich überwacht oder wiederkehrend geprüft werden können.

Ein Verzicht auf wiederkehrende Prüfungen ist dann möglich, wenn das Schadensausmaß (einschließlich Folgeschäden) hinsichtlich einer möglichen Spaltproduktfreisetzung gering ist und/oder die Komponente nachweislich hinreichend geringen Belastungen ausgesetzt ist und in ausreichend hoher Qualität gefertigt wurde. Die Voraussetzungen sind unter folgenden Umständen erfüllt:

- Auslegung mit ausreichenden Sicherheitszuschlägen
- genaue Kenntnis des Werkstoffverhaltens
- geeignete konstruktive Gestaltung
- Überwachung der Betriebsparameter und Kontrolle der Einhaltung von Grenzwerten
- Gewährleistung der Austauschbarkeit zeitlich begrenzt einsetzbarer Komponenten

Für die festigkeitsmäßige Beurteilung der konventionellen Druckbehälter kommen vereinfachte Berechnungsverfahren zur Anwendung, die die Aspekte der Ermüdung oder der Kriech-Ermüdung qualitativ erfassen.

In der TRD 508 werden Maßnahmen zur Vermeidung von Kriech-Ermüdungs-Schäden des Werkstoffs einer Komponente aufgeführt, die weitgehend auch auf HTR-Komponenten angewendet werden können.

Solche Maßnahmen sind z. B.:

- registrierende Messung (analog oder digital) für die Beurteilung der Druck- und Temperaturbeanspruchung
- registrierende Messung (analog oder digital) von Temperaturdifferenzen innerhalb der Wanddicke an den Bauteilen, die voraussichtlich die zulässige Temperaturänderungsgeschwindigkeit bestimmen
- zerstörungsfreie Prüfungen bei der Herstellung und gezielt bei wiederkehrenden Prüfungen
- Messungen zur Feststellung der Geometrie, z. B. Wanddicken- und Unrundheitsmessungen
- Feststellung der bleibenden Dehnung
- rechnerische Verfolgung der Erschöpfung

Im Rahmen der betrieblichen Überwachung erfolgen zusätzlich Leckagemessungen, Aktivitätsmessungen und Gasanalysen.

Die angesprochenen Verfahren haben sich z. T. in der Praxis bewährt.

Fazit:

Für die Beurteilung des Verhaltens von HTR-Komponenten werden Gesichtspunkte der konstruktiven Gestaltung und Dimensionierung erörtert sowie Rechnungen zum Kriechratcheting, Kriechbeulen und Kriech-Ermüdungs-Verhalten diskutiert. Dabei zeigt sich, daß bei Anwendung der vereinfachten Methoden entsprechend ASME-CC N 47 im Hochtemperaturbereich aufgrund großer Konservativitäten das Werkstoffpotential zu gering ausgenutzt wird. Bruchmechanische Analysen für den Hochtemperaturbereich sind nach Stand von Wissenschaft und Technik zur Zeit nicht regelfähig. Im Rahmen der betrieblichen Überwachung müssen wiederkehrende Prüfungen dem Werkstoffverhalten und den zur Zeit geringen Auslegungserfahrungen für Anwendung im angestrebten Temperaturbereich Rechnung tragen.

Dokumentationen zu Kapitel 11:

- Bauteilverhalten ohne Fehler RWTÜV;  
Becker
- Erläuterung von Ratcheting am einfachen 3-Stab-Modell GHT/IA;  
Angerbauer
- Kriechratchetinganalysen KFA;  
Over
- Parameterstudie zu Creep-Ratcheting HRB;  
Kemter, Sindel
- Kriechratcheting eines Rohren infolge eines wechselnden Temperaturgradienten von  $\pm 15$  K (Betriebseinfluß) GRS;  
Bieniusa
- Kriechratcheting eines Rohres infolge eines wechselnden Temperaturgradienten von  $\pm 15$  K (Heißsträhneneinfluß) GRS;  
Bieniusa
- Kriechbeulen von Hochtemperaturkomponenten (Theoretische Vorarbeit für die Prüfung bauteilrelevanter Proben) KFA;  
Over
- Ermüdungsuntersuchungen am Heißen Sammler des He/He-Wärmetauschers infolge thermischer Belastungen GHT/IA  
Schulze
- Probleme der Anwendung der Bruchmechanik im Rahmen eines Regelwerkes für Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C KFA;  
Penkalla

- Anforderungen und Möglichkeiten für wiederkehrende Prüfungen von HTR-Primärkreis-komponenten GRS; RWTÜV, GHT/IA; Bieniussa, Hahn, Fischer, Seehafer, Werden
- Stellungnahme zur Auslegungsberechnung eines RSO-Rohres der Firma LURGI KFA; Breitbach, Over
- Rechnungen zu Spannungsrelaxation für ein Rechenmodell im Hochtemperaturbereich IA; Schäfer
- FE-Rechnungen zur gleichzeitigen Beanspruchung von Rohrwandungen durch Primär- und Thermospannungen im Kriechbereich KFA; Breitbach
- Relaxation analog Robinson GRS; Bieniussa
- Mathematische Bestimmung der Konstanten in der nach Robinson ermittelten Relaxationsgleichung GRS; Bieniussa
- Auswahl kritischer Bauteile für die Durchführung von Störfallanalysen aus der Sicht der Festigkeit IA;

Literatur zu Kapitel 11:

- /1/ Mannesmann-Röhren-Werke  
Warmfeste und hochwarmfeste Stähle  
MRW, Düsseldorf, Mai 1973.
- /2/ H. Tada, P. C. Paris, G. R. Irwin:  
The Stress Analysis Handbook, Del Research Corporation, St. Louis, Missouri 63105, 1973

- /3/ Annual Book of ASTM Standards, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Designation: E 399 - 78
  
- /4/ Fracture Toughness Testing and its Application, ASTM STP 381, 1964
  
- /5/ BS 5762: Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing, Brit. Stand. Inst., London 1979
  
- /6/ H. C. Zeislmair, W. Dahl:  
Ergebnisse eines Ringversuches zur Bestimmung der Rißspitzen-aufweitung, Berichtsband z. 12. Sitzung des DVM-AK "Bruchvorgänge", Freiburg, 1980
  
- /7/ M. F. Kanninen, D. Broek, G. T. Hahn, C. W. Marschall, E. F. Rybicki, G. M. Wilkowski:  
Towards an Elastic-Plastic Fracture Mechanics Predictive Capability for Reactor Piping, Nucl. Engin. a. Design, 48 (1978), 117 - 134
  
- /8/ J. R. Rice:  
A Path Independent Integral and the Approximation Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks, J. Appl. Mechanics 35 (1968) 379 - 386.
  
- /9/ N. L. Goldman, J. W. Hutchinson:  
Fully Plastic Crack Problems: The Center-Cracked Strip Under Plane Strain, Int. J. Solids Structures, 11 (1975), 575-591
  
- /10/ J. A. Begley, J. D. Landes:  
The J-Integral as a Fracture Criterion and the Effect of Specimen Geometry on  $J_{Ic}$ , loc. cit., 24 - 39, ASTM STP 514, 1974, 1 - 20

- /11/ J. Kiefner, W. A. Mayey, R. J. Eiber, A. R. Duffy:  
Failure Stress Levels of Flames in Pressurized Cylinders, ASTM  
STP 536, 1973, 461-481
- /12/ H. Hahn:  
Arch. Eisenhüttenwesen 44, 7, S. 559/563 (1973)
- /13/ H. Riedel:  
A Contribution to the Theory of Fracture Mechanics under Creep  
Conditions, I. Mech. E., 1980, Paper C118/80
- /14/ J. D. Landes, I. A. Begley:  
A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth, ASTM STP  
590, 1976, 128 - 148
- /15/ K. Sadananda, P. Shahinian:  
Application of Fracture Mechanics Techniques to High Temper-  
ature Crack Growth, in Fracture Mechanics, ed. N. Perrone,  
H. Liebowitz, D. Mullville, W. Pilkey, University Press of  
Virginia, Charlottesville, 1978, 685-703
- /16/ R. Pilkington:  
Critical Assessment - Creep Crack Growth in Low-Alloy Steels,  
Metal. Sci., 1979, 555-564
- /17/ M. Reich, E. P. Esztergar:  
Application of Fracture Mechanics Methods in Safety Analysis  
of Piping Components in Subcreep and Creep Behaviour, Nucl.  
Engineering and Design, 51 (1979), 177-231
- /18/ F. K. G. Odqvist, J. Hult:  
Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe, Springer-Verlag  
(1962)
- /19/ R. Koterazwa, T. Moris:  
Applicability of Fracture Mechanics Parameters to Crack Propa-  
gation under Creep Condition, Trans. ASME, J. Eng. Mat.  
Technol. 1977, 198-305

- /20/ F. A. Leckie:  
 "A Review of Bounding Techniques in Shakedown and Ratcheting at Elevated Temperatures", Welding Research Council Bulletin No. 195 (June 1974), 1
- /21/ F. A. Leckie, J. B. Martin:  
 Deformation Bounds for Bodies in a State of Creep, J. Appl. Mech., Vol. 34, No. 2 (1967) 411
- /22/ A. Pounter:  
 On the Relationship Between Plastic Shakedown and the Repeated Loading of Creeping Structures, J. Appl. Mech., Vol. 38, No. 2 (1971) 437
- /23/ J. J. Williams, F. A. Leckie:  
 A Method for Estimating Creep Deformations of Structures Subjected to Cyclic Loading, J. Appl. Mech., (nach 1974)
- /24/ W. Schoch, E. Krägeloh, J. Ewald:  
 Versagen durch einsinnig stufenweise Verformung (incremental collapse) - Ursache und Erscheinung -, VGB Kraftwerkstechnik 58, Heft 1, Jan. 1978
- /25/ H. Huff, W. Schönfelder:  
 Zum Einfluß wechselnder Temperaturen auf das Zeitstandverhalten von Nickelbasislegierungen", Zeitschrift für Werkstofftechnik 5 (1974) 258
- /26/ N. G. Hoff, W. E. Gashman, W. Nachbar:  
 A Study of Creep Collapse of a Long Circular Cylindrical Shell under Uniform External Pressure, J. Aerospace Sci. 26 (1959) 663
- /27/ E. Glückler, E. Passig, J. Höckel:  
 Kriechbeulen von Brennelementhüllrohren", Nuclear Eng. and Design 7 (1968) 236 - 248



- /28/ H. J. Seehafer:  
Stand der Arbeiten zum HT-Regelwerk mit Darlegung der durchgeführten Festigkeitsanalysen an kritischen Bauteilen der He/He-ZWT", Vortragsmanuskript anlässlich des He-He-ZWT-Symposiums, 26.09.1980
- /29/ K. Nagato, N. Takigawa:  
Creep Collapse of a Cylindrical Shell Subjected to External Pressure at High Temperature, 5th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 13.-17.10.1979
- /30/ J. Bree:  
Elastic-Plastic Behaviour of Thin Tubes Subjected to Internal Pressure and Intermittent High-Heat Fluxes with Application to Fast-Nuclear Reactor Fuel Elements, J. of Strain Analyses, Vol. 2, No. 3 (1967) 226
- /31/ T. M. Mulcahy:  
An Assessment of Kinematic Hardening Thermal Ratcheting, J. of Eng. Mat. and Techn. (1974) 214
- /32/ T. M. Mulcahy:  
Thermal Ratcheting of a Beam Element having an Idealized Bauschinger Effect, J. of Eng. Mat. and Tech. (1976) 264
- /33/ D. Burgreen:  
The Thermal Ratched Mechanisms  
J. Basic Eng. Vol. 90, No. 3, Sept. 1968
- /34/ D. Burgreen:  
Structural Growth Induced by Thermal Cycling  
J. Basic Eng., Vol. 90, No 3, Dec. 1968
- /35/ W. J. O'Donnell, J. Porowski:  
Upper Bounds for Accumulated Strains Due to Creep Ratcheting", Welding Research Council Bulletin No. 195, June 1974, S. 57

- /36/ W. F. Anderson:  
Creep Ratcheting Deformation and Rupture Damage by a Thermal Transient Stress Cycle, First National Congress of Pressure Vessel and Piping Technology, May 1971, San Francisco
- /37/ J. M. Corum, W. L. Greenstreet, K. C. Lui, C. E. Pugh, R. W. Swindeman:  
Interim Guidelines for Detailed Inelastic Analysis of High Temperature Reactor System Components,  
ORNL-5014, 1974
- /38/ Strahlenschutzverordnung:  
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen  
13. Oktober 1976/ 15. Dezember 1977
- /39/ Bundesminister der Innern:  
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke  
21. Okt. 1977
- /40/ Bundesminister des Innern:  
Interpretation zu den Sicherheitskriterien  
für Kernkraftwerke  
28. Nov. 1979
- /41/ Bundesminister des Innern:  
Zusammenstellung der im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren für Kernkraftwerke erforderlichen Information über  
- den Reaktordruckbehälter, 11. Okt. 1977  
- Rohrleitungen, Pumpen und Armaturen des Hauptkühlkreises, 10. Mai 1978  
- die Dampferzeuger, 26. Okt. 1978
- /42/ Bundesminister des Innern:  
Richtlinien für den Strahlenschutz des Personals bei der Durchführung von Instandhaltungsarbeiten in KKW mit LWR: Die während der Planung der Anlage zu treffende Vorsorge  
31. August 1978

- /43/ Bundesminister des Innern:  
Richtlinien für das Verfahren zur Vorbereitung und Durchführung von Instandhaltungs- und Änderungsarbeiten in Kernkraftwerken  
17. Juli 1978
- /44/ Reaktor-Sicherheitskommission:  
RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren  
3. Ausgabe, 14. Oktober 1981
- /45/ Reaktor-Sicherheitskommission:  
Rahmenspezifikation "Basissicherheit von druckführenden Komponenten"  
25. April 1979
- /46/ Reaktor-Sicherheitskommission:  
RSK-Leitlinien für die Siedewasserreaktoren  
11. März 1975

## 12. Vorschriften für die Fertigung und Montage von Komponenten

Ein Entwurf für "Vorschriften für die Herstellung von Komponenten und Systemen für gasgekühlte Reaktoren mit Auslegungstemperaturen oberhalb 800 °C", der an die KTA-Regel 3201.3 angelehnt ist, liegt vor. Hierin sind die allgemein gültigen Regelungen sowie die für Komponenten aus austenitischen Stählen und Nickelbasislegierungen getroffenen Festlegungen, soweit für HTR-Werkstoffe und Komponenten anwendbar, übernommen.

Da die Herstellung von Komponenten für Hochtemperaturreaktoren in vielen Bereichen nicht wesentlich von den vergleichbaren LWR-Komponenten abweicht, ist der Detaillierungsgrad des erarbeiteten Regelentwurfes verhältnismäßig groß.

Zu einzelnen Bereichen des Entwurfes ergeben sich folgende Bemerkungen:

Bei der Vorprüfung und Dokumentation wird ein vereinfachtes Dokumentationssystem vorgeschlagen, das durch

- Benutzung von Vorprüfunterlagen für Dokumentationszwecke
- Wegfall zahlreicher Protokolle durch Stempelung bei Prüfungen mit Ja-Nein-Aussage
- Unterteilung der Dokumentation in die beim Hersteller verbleibende Zwischenablage und die sicherheitstechnisch relevante Endablage

zu einer wesentlich verbesserten Transparenz der Dokumentation bei drastisch reduziertem Papiervolumen kommt.

Im Gesichtspunkt "Schweißtechnische Gestaltung und arbeitstechnische Grundsätze" fand die neue Abwicklungsregelung bei Nachbesserungen und Reparaturen Eingang. Danach können Abweichungen ohne Fertigungsunterbrechung und Standardreparaturen mit im Zuge der Vorprüfung freigegebenen Standardreparaturplänen abgewickelt

werden. Diese Regelung stellt einen wichtigen Schritt zur Vereinfachung der Abwicklung bei der Komponentenherstellung dar.

Im Hinblick auf Verfahrensprüfungen müssen Regelungen für Herstellungsdetails, z. B. Rohr-/ Rohrbodenverbindungen offenbleiben, bis entsprechende konstruktive Festlegungen getroffen und Fertigungsentwicklungen abgeschlossen sind.

Eine noch zu schließende Lücke bezüglich der zerstörungsfreien Prüfbarkeit betrifft die Ultraschallprüfung der HTR-Komponenten. Neuere Ergebnisse zeigen allerdings, daß die vorgesehenen Nickelbasiswerkstoffe eine den stabilisierten austenitischen Stählen vergleichbare Prüfbarkeit aufweisen.

Der vorläufige Entwurf einer Regelung bedarf noch in einigen Punkten einer schrittweisen Anpassung und Ergänzung im Hinblick auf die HTR-spezifischen Besonderheiten.

Fazit:

Für die Vorschriften zur Herstellung von Komponenten wird vorgeschlagen, die LWR-KTA-Regel 3201.3 für den Bereich austenitische Werkstoffe zu übernehmen, wobei HTRspezifische Details gesondert einzuarbeiten sind.

Dokumentationen zu Kapitel 12:

- Vorschriften für die Herstellung von RWTÜV;  
Komponenten und Systemen für gasgekühlte Just  
Reaktoren mit Auslegungstemperaturen  
oberhalb 800 °C

Literatur zu Kapitel 12:

- /1/ KTA 3201.3  
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren  
Teil: Herstellung

### 13. Ausblick

Mit den im Berichtszeitraum erarbeiteten Unterlagen ist ein Rahmen abgesteckt worden für die Vorgehensweise bei der Werkstoffauswahl, Auslegung, Herstellung und Beurteilung von hochtemperaturbeaufschlagten metallischen Komponenten mit Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C für zukünftige HTR-Anlagen.

Es wurde gezeigt, daß grundsätzlich andere Auslegungsregeln und Auslegungskenndaten als im LWR-Regelwerk erforderlich sind, da das Verhalten metallischer Werkstoffe in dem angesprochenen Temperaturbereich entscheidend durch die Zeitabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie der Strukturstabilität bestimmt wird. Die für die Auslegung erforderlichen Werkstoffkenngrößen liegen nach Auswertung der laufenden HTR-Werkstoffprogramme weitgehend vor. Dabei können die zeitabhängigen Auslegungswerte bis zu rd. 70 000 h angegeben werden, für längere Auslegungsdauern sind die Extrapolationen noch unsicher. Mit den Versuchsergebnissen längerer Versuchsdauern als 25 000 h aus den laufenden Untersuchungen und unter Einbeziehung der Ergebnisse aus HTR-Werkstoffprogrammen in Japan und in den USA können diese Auswertungen noch auf eine breitere Datenbasis gestellt werden und für längere Zeiten extrapoliert werden.

Nach Beschreibung der Lastfälle und Beanspruchungsstufen wurden Vorschläge zur Vermeidung der denkbaren Versagensarten gemacht, eine Vorgehensweise zur Ableitung von zeitunabhängigen und zeitabhängigen Spannungsvergleichswerten vorgeschlagen und Sicherheitsabstände gegen Belastung und Dehnung benannt.

Für die inelastische Analyse liegen die Stoffgesetze zur mathematischen Beschreibung des zeitabhängigen Spannungs-Verformungsverhaltens in ersten Ansätzen vor. Zur Festlegung von Stoffgesetzen als Regel für die in Frage kommenden Werkstoffe muß aber der Datenstand noch verbreitert und die vorhandenen Ansätze verbessert werden. Im Rahmen der Werkstoffprogramme für



zukünftige HTR-Anlagen laufen Langzeitversuche an Normproben unter einachsiger Belastung in simuliertem HTR-Helium. Mit den dort ermittelten Kennwerten kann das Verformungs- und Versagensverhalten abgeschätzt werden. Vor Festlegung der Stoffgesetze in einem Regelwerk müssen die Ergebnisse noch experimentell durch die laufenden Untersuchungen an Norm- und bauteilähnlichen Proben unter mehrachsigen Belastungen mit simulierten Belastungshistogrammen abgesichert werden.

Für die Festschreibung einer Regel zur Schadensakkumulation, die eine Voraussetzung für die Lebensdauerermittlung einer Komponente unter komplexen Belastungen darstellt, reicht der Umfang der vorliegenden Versuchsergebnisse derzeit nicht aus. Ziel der laufenden Untersuchungen ist es, den Einfluß der zu erwartenden Lastfolgen auf das Verformungs- und Versagensverhalten zu erfassen. Die Parameter für diese Untersuchungen sind vielfältig. Zur Begrenzung des experimentellen Aufwandes wird empfohlen, die Belastungsgrößen im Versuch an den erwarteten Betriebsbedingungen zu orientieren. Darüber hinaus müssen die Untersuchungen die Hypothesen über das Werkstoffverhalten bestätigen oder zur Formulierung verbesserter Hypothesen führen. Vorerst wird als praktikable Vorgehensweise eine modifizierte lineare Schadensakkumulation vorgeschlagen.

Bei der Erörterung des Sicherheitskonzeptes ist wiederholt geprüft worden, ob auch für die hochtemperaturbeaufschlagten Komponenten bruchmechanische Analysen zur Beurteilung des Bauteilverhaltens herangezogen werden können. Es gibt einige Ansätze, die den Rißfortschritt bei hohen Temperaturen zu beschreiben versuchen, jedoch sind sie nicht ausreichend abgesichert, auch hier müssen erst die laufenden Untersuchungen abgewartet werden, bevor eine Empfehlung für eine KTA-Regel gegeben werden kann.

Vor Festschreibung als KTA-Regel ist es sinnvoll, neben den Ergebnissen aus nationalen Arbeiten auch solche aus den internationalen HTR-Programmen einfließen zu lassen. Durch Zusammenarbeit mit den ausländischen Fachleuten soll eine international gleich-

artige Vorgehensweise zur Auslegung, Herstellung und Beurteilung von HTR-Komponenten angestrebt werden.

Auch wenn noch nicht alle Versuchsergebnisse und Berechnungsverfahren vorliegen, können mit dem erreichten Kenntnisstand und den vorgeschlagenen Vorgehensweisen die am höchsten beanspruchten metallischen Komponenten für eine im Hinblick auf eine Prototypanlage vertretbare Betriebszeit (z. B. 70 000 h) ausgelegt werden. Der Fachkreis "Regelwerk" hält deshalb aus seiner Sicht - bezüglich der Auslegung der o. g. Komponenten - die Voraussetzungen und Grundlagen für den Bau einer Prototypanlage zur Erzeugung nuklearer Prozeßwärme mit Temperaturen oberhalb 800 °C für gegeben.

ANHANG A:

**Werkstoffdatenblätter**

Die vorliegenden Datenblätter für die Werkstoffe

NiCr 22 Co 12 Mo

NiCr 22 Fe 18 Mo

X 10 NiCrAlTi 32 20

NIMONIC alloy 86

geben einen Überblick über derzeit vorhandene Daten soweit sie für Anwendungstemperaturen oberhalb 800 °C von Bedeutung sind.

Im einzelnen sind folgende Daten zu folgenden Merkmalen in Diagrammen erfaßt:

- Physikalische Eigenschaften
- Mechanische Eigenschaften
- Zeitstandverhalten
- Ermüdungsverhalten
- Korrosionseigenschaften

Die Daten sind nicht nach Erzeugnisformen unterschieden, da dies der derzeitige Datenstand noch nicht erlaubt.

<b>Datenblatt</b>	<b>2.4663</b>
<b>Stand: 1.1.1984</b>	<b>Ni Cr 22 Co 12 Mo</b>

## ALLGEMEINES

Ni Cr 22 Co 12 Mo ist eine Nickel-Chrom-Kobalt-Molybdän-Legierung mit hoher Warmfestigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit.

Ni Cr 22 Co 12 Mo findet Anwendung im Turbinenbau und für Komponenten, die hohen Temperaturen in oxidierenden und aufkohlenden Atmosphären ausgesetzt sind.

Ni Cr 22 Co 12 Mo ist erhältlich in Form von Blechen, Platten, Stangen und Rohren.

Auslegungsdaten für Ni Cr 22 Co 12 Mo in anerkannten Regelwerken liegen derzeit nicht vor.

## BEZEICHNUNGEN

<b>NORM , HERSTELLER</b>	<b>BEZEICHNUNGEN</b>
DIN - Bezeichnung	Ni Cr 22 Co 12 Mo
Werkstoffnummer (VdEH)	2.4663
Int. Nickel Corp. (INCO)	INCONEL alloy 617
Huntington Alloys Inc.	INCONEL alloy 617
VDM	Nicrofer 5520
TEW (Erschmelzung)	in Vorbereitung
Mannesmann Röhrenwerk	nach Werkstoffnummer

## CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

<b>Gew- %</b>				<b>Gew- %</b>			
	<b>min.</b>	<b>-</b>	<b>max.</b>		<b>min.</b>	<b>-</b>	<b>max.</b>
<b>C</b>	0,04	-	0,08	<b>Si</b>		<	0,7
<b>Fe</b>		<	1,5	<b>Al</b>	0,6	-	1,3
<b>Cr</b>	20,0	-	23,0	<b>Ti</b>	0,2	-	0,6
<b>Ni</b>	Bal	-	44,5	<b>S</b>		<	0,015
<b>Mo</b>	8,0	-	10,0	<b>P</b>		<	0,015
<b>Mn</b>		<	0,7	<b>N</b>	0,005	-	0,01
<b>Co</b>	10,0	-	13,0	<b>B</b>	0,002	-	0,005

(Angaben nach IA-Bericht 55.3389.4"A")

VORSCHRIFTEN FÜR HERSTELLUNG, WÄRMEBEHANDLUNG UND KORNGRÖSSEN**A) HERSTELLUNG:**

Schmiedestücke: Gute Warmformgebung, erfordert hohe Umformenergie, Kaltverformung bewirkt starke Kaltverfestigung, Herstellung dünner Bleche und dünnwandiger Rohre schwierig.

Schweißungen: Schweißbar mit allen konventionellen Schweißverfahren. Schweißzusätze für Schutzgas-Lichtbogenschweißen erhältlich.

**B) WÄRMEBEHANDLUNG:**

Standard: Lösungsglühen bei  $1175 \pm 15^\circ\text{C}$ , Abkühlung in Luft oder Wasser.

**C) VORHANDENE SPEZIFIKATIONEN:**

Seitens der Hersteller wird empfohlen, folgende Spezifikationen zugrunde zu legen:

chemische Analyse: AMS 2269

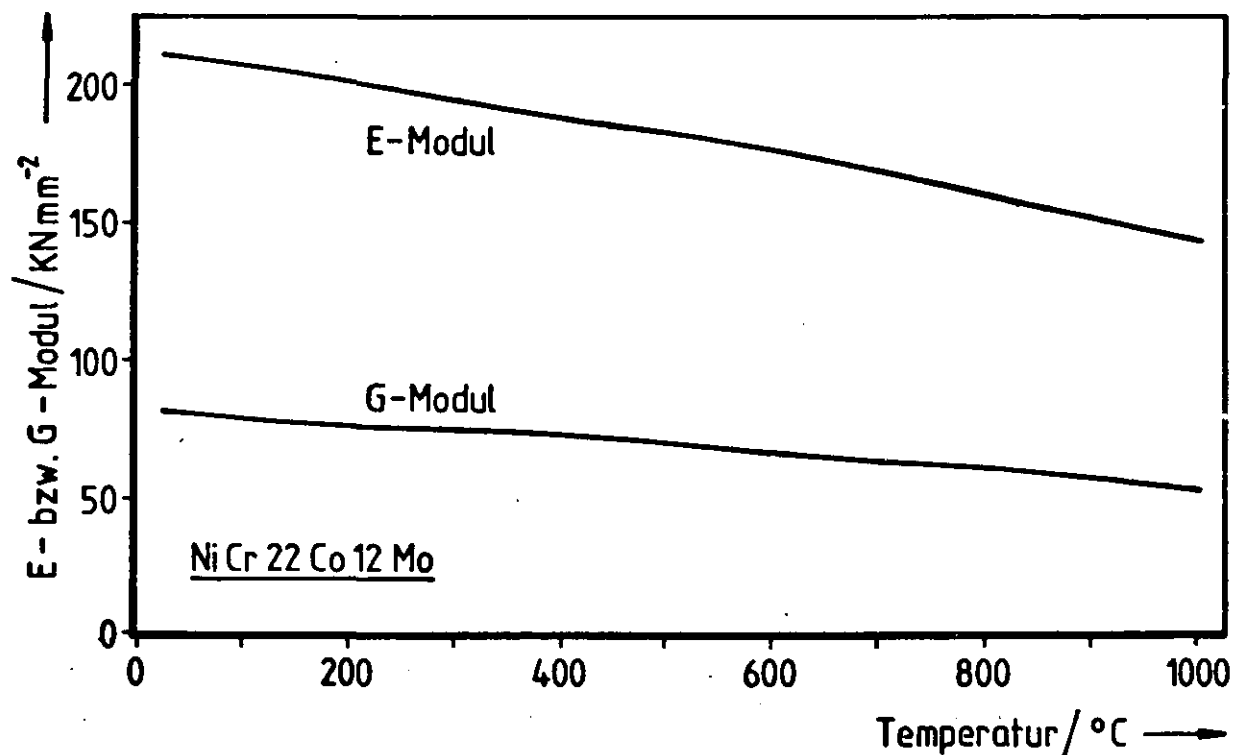
Toleranzen für  
Stangenmaterial: AMS 2261

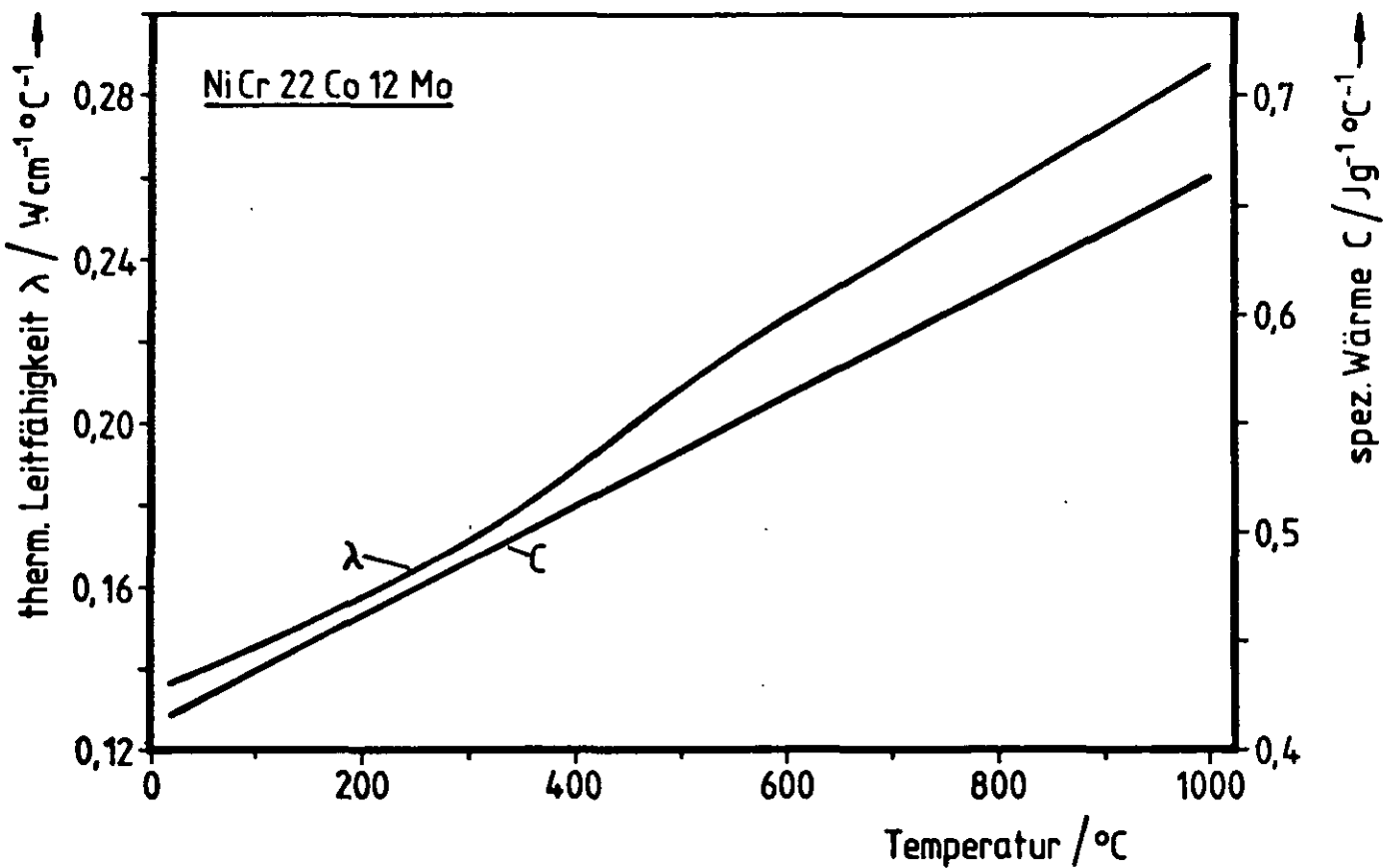
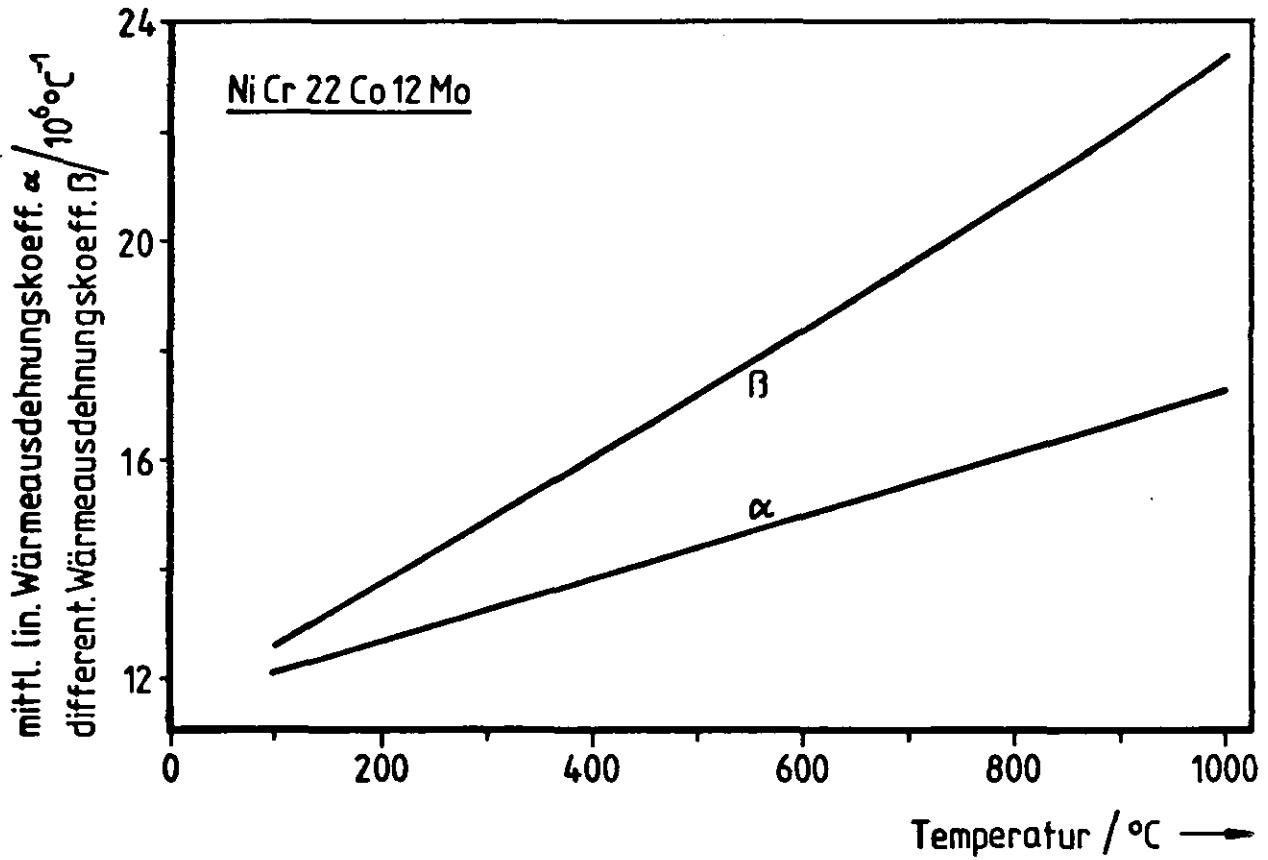
Für Anwendungen in NPW-Anlagen liegt der Entwurf einer PNP-Spezifikation vor (IA-Notiz 55.4099.0"B")

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Dichte:  $8,36 \text{ gcm}^{-3}$

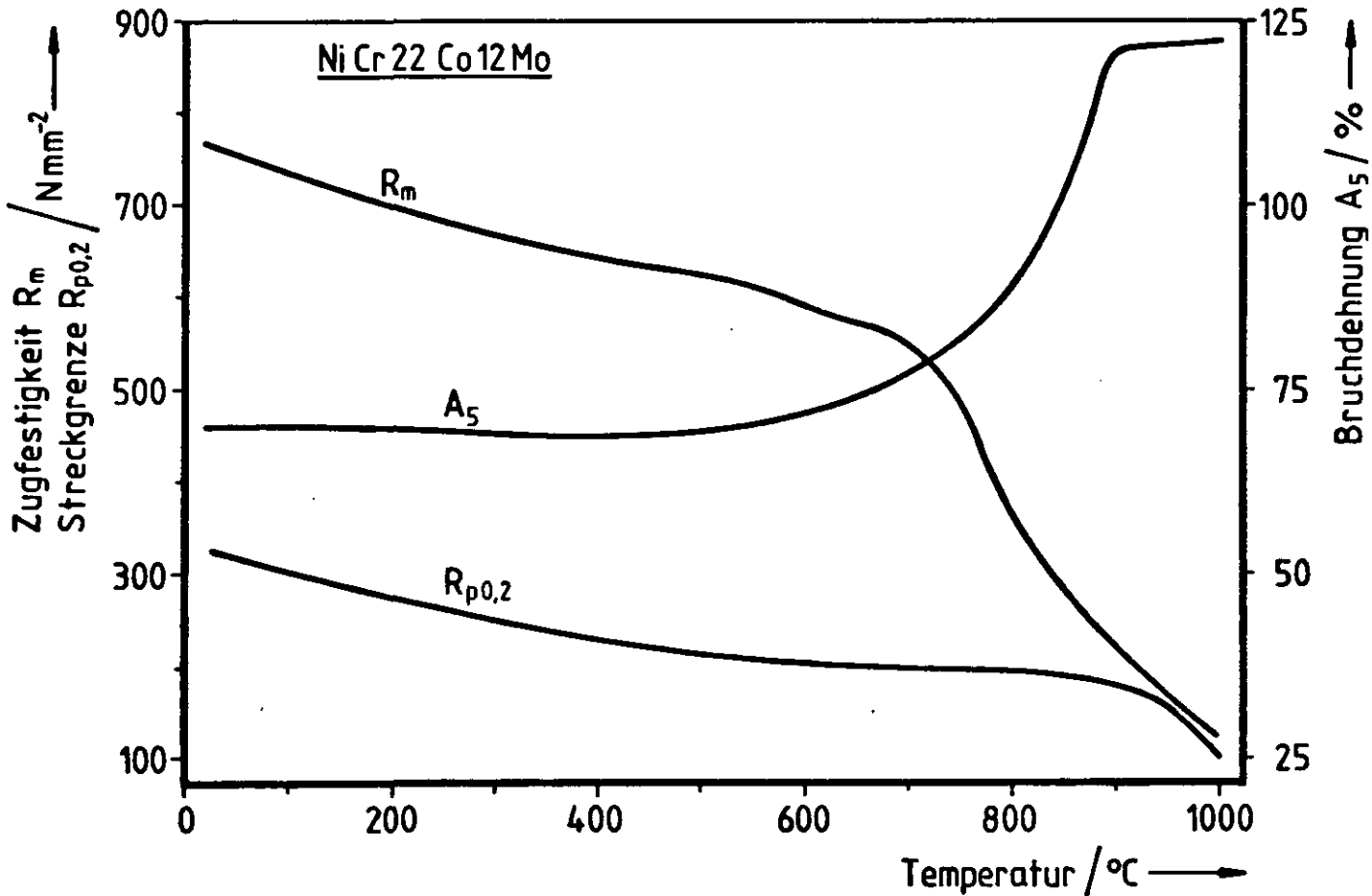
Schmelztemperatur:  $1330 - 1375^\circ\text{C}$





MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

ERGEBNISSE AUS ZUGVERSUCHEN IM ANLIEFERUNGSZUSTAND

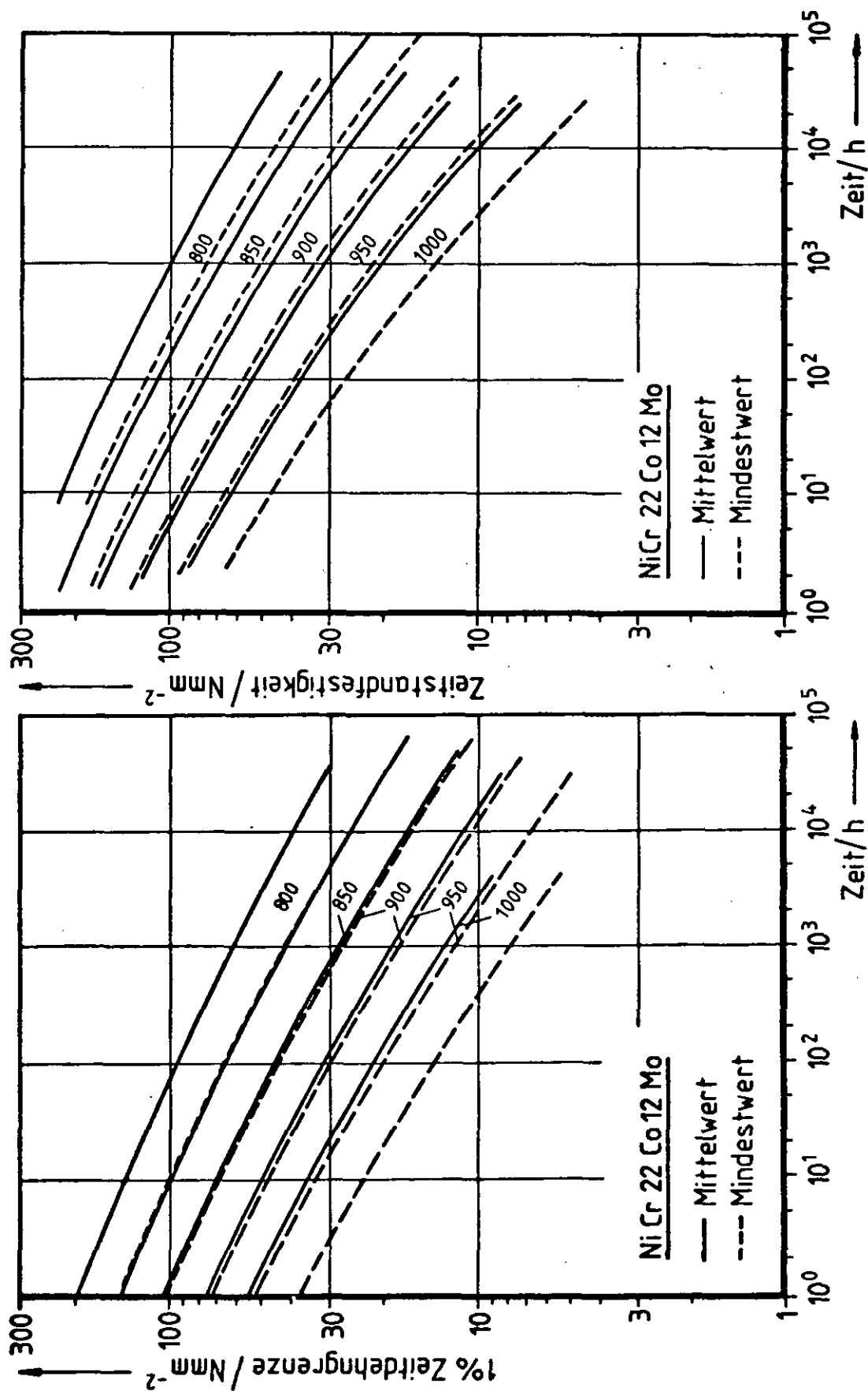


Herstellerangaben

Mit zunehmender Temperatur werden Ergebnisse aus Warmzugversuchen abhängig von der Abzugsgeschwindigkeit, mit der der Zugversuch gefahren wird. Die Angaben über die 0,2%-Dehngrenze und Zugfestigkeit können daher nur einen ungefähren Anhaltspunkt darstellen.

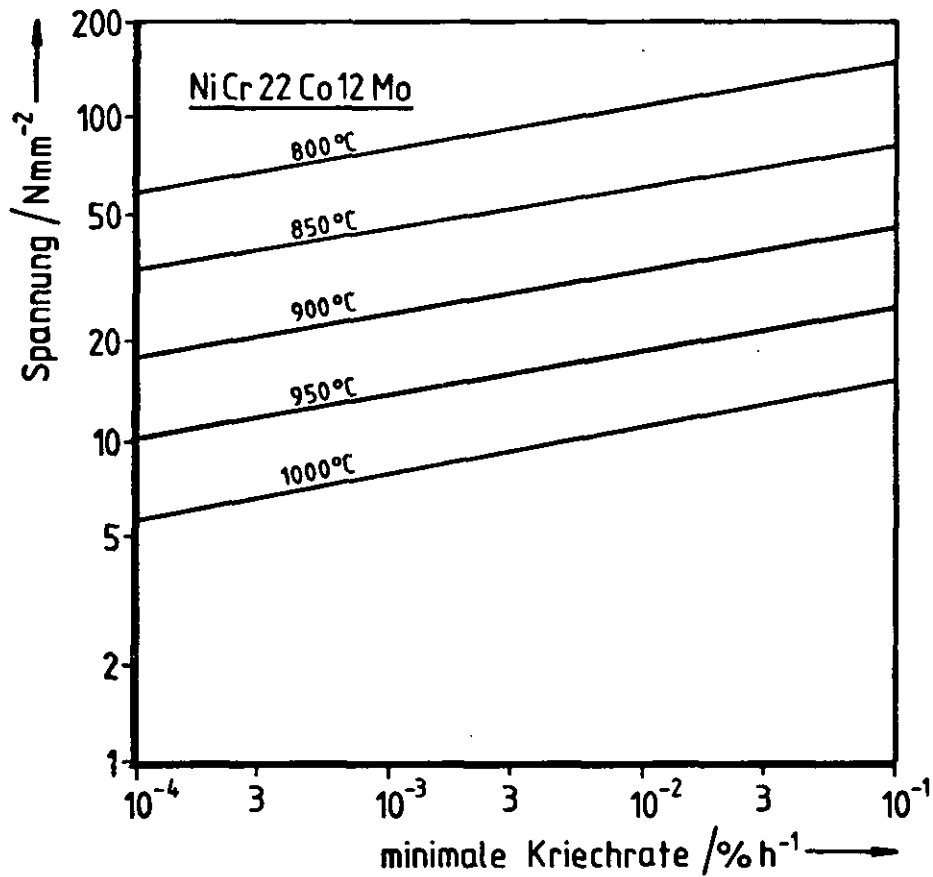
## ZEITSTANDVERHALTEN

## ZEITSTANDFESTIGKEIT UND 1% - ZEITDEHNGRENZE





## KRIECHDATEN

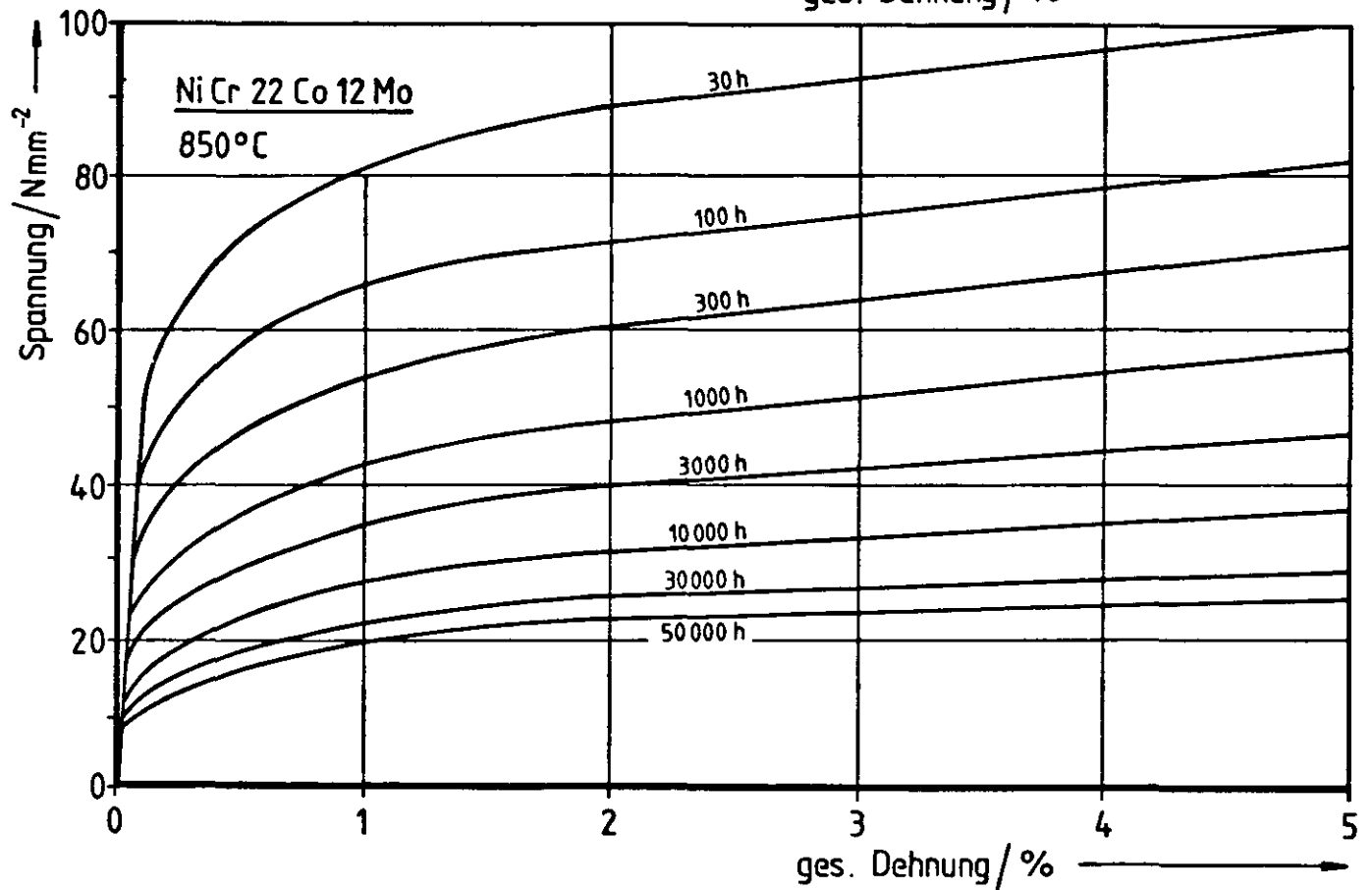
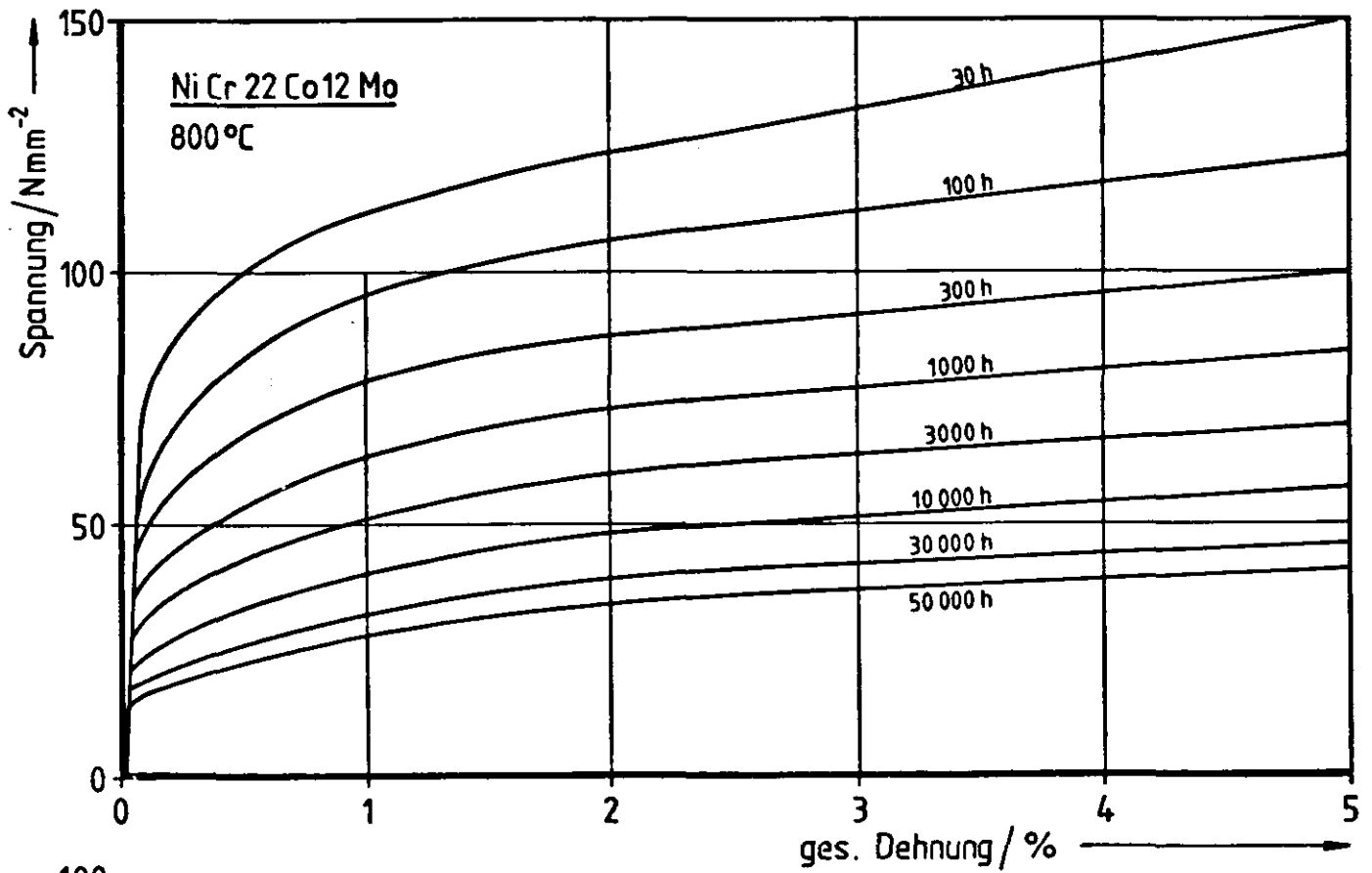


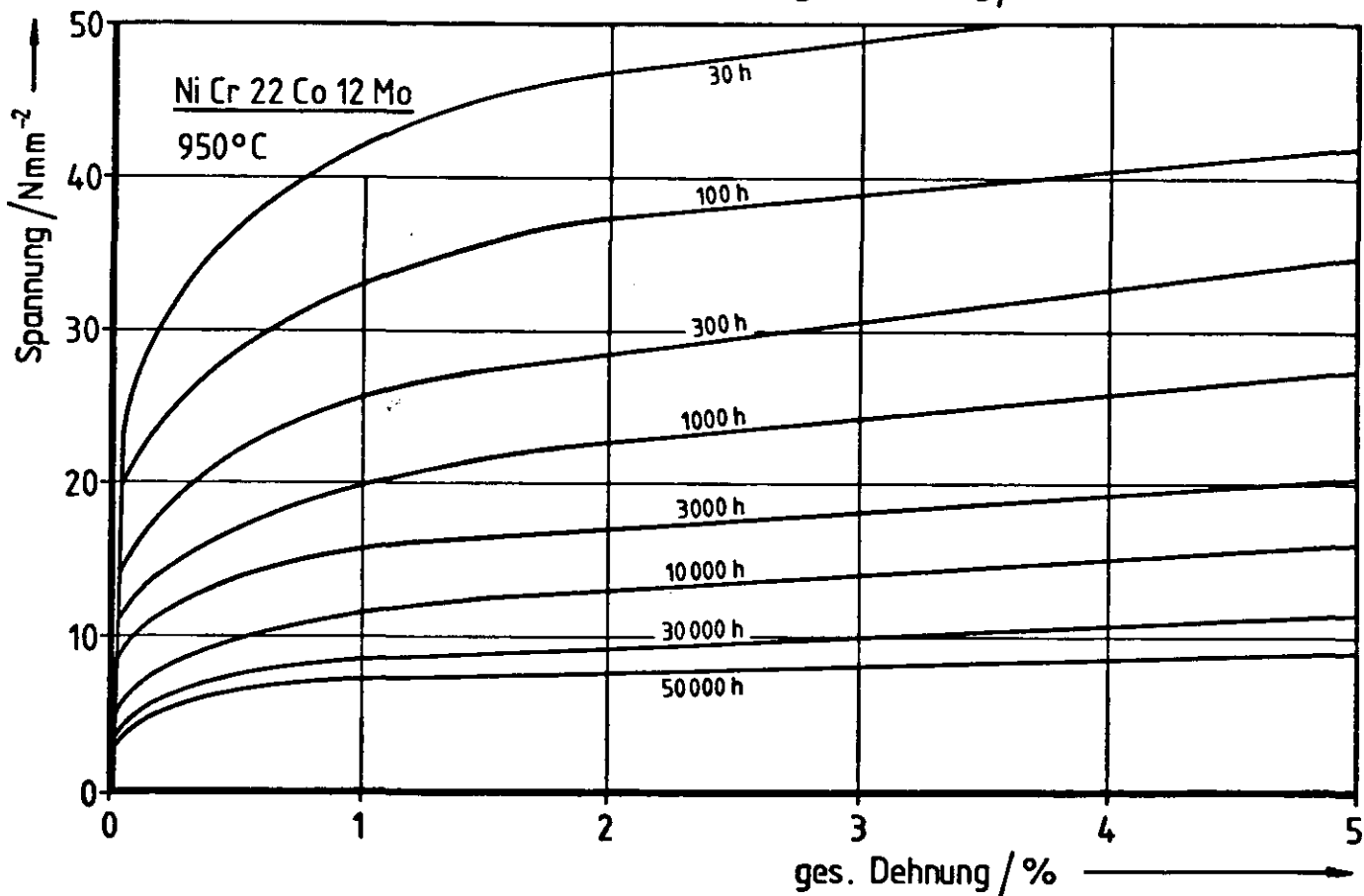
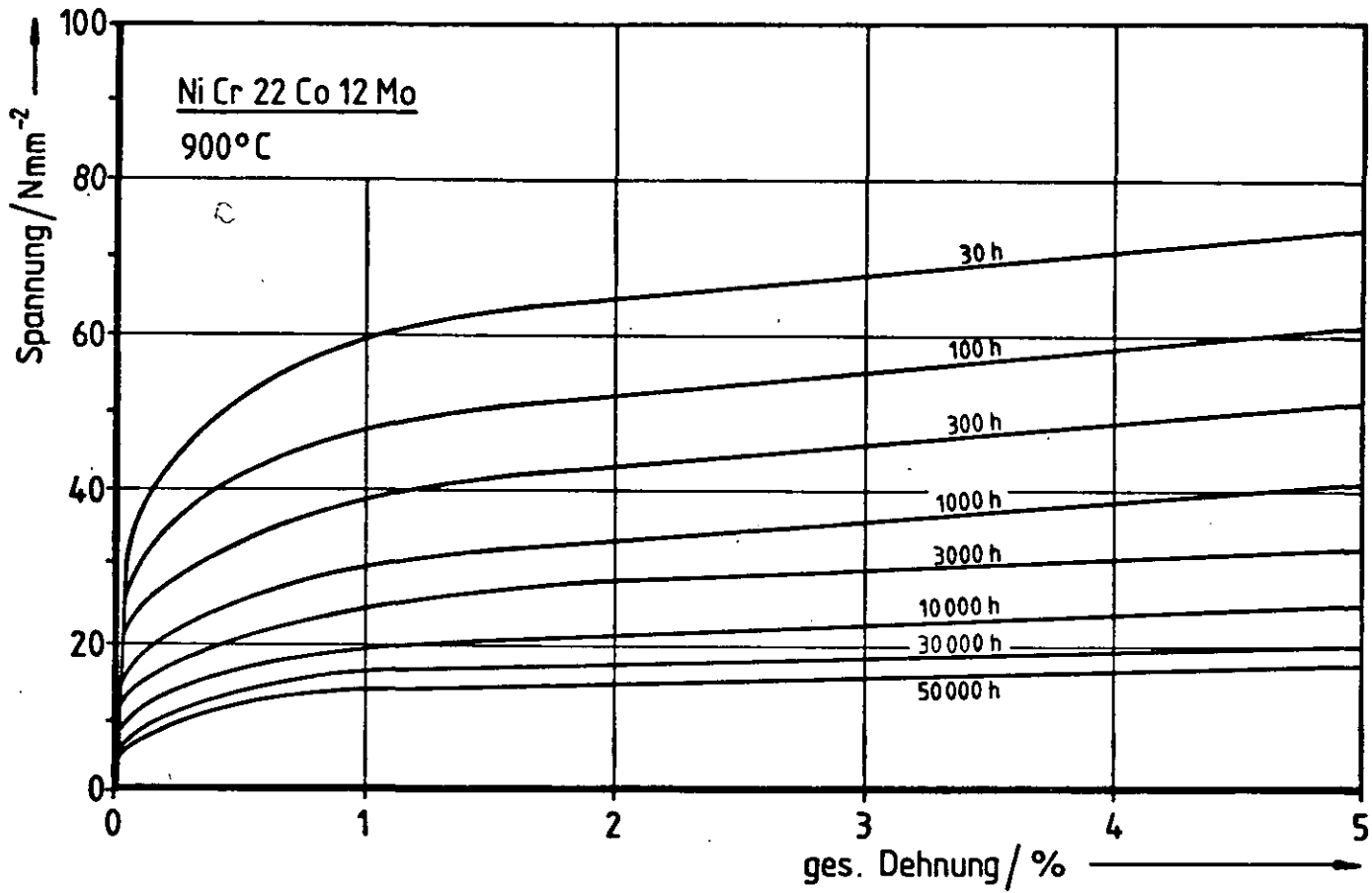
Interpolierte Werte, ermittelt aus Ergebnissen des EG-HTR-Werkstoffprogramms und aus Herstellerangaben über Kriechversuche an Luft. Je nach Versuchsschmelze können die k- und n-Werte um bis zu 50% von den angegebenen Mittelwerten abweichen.

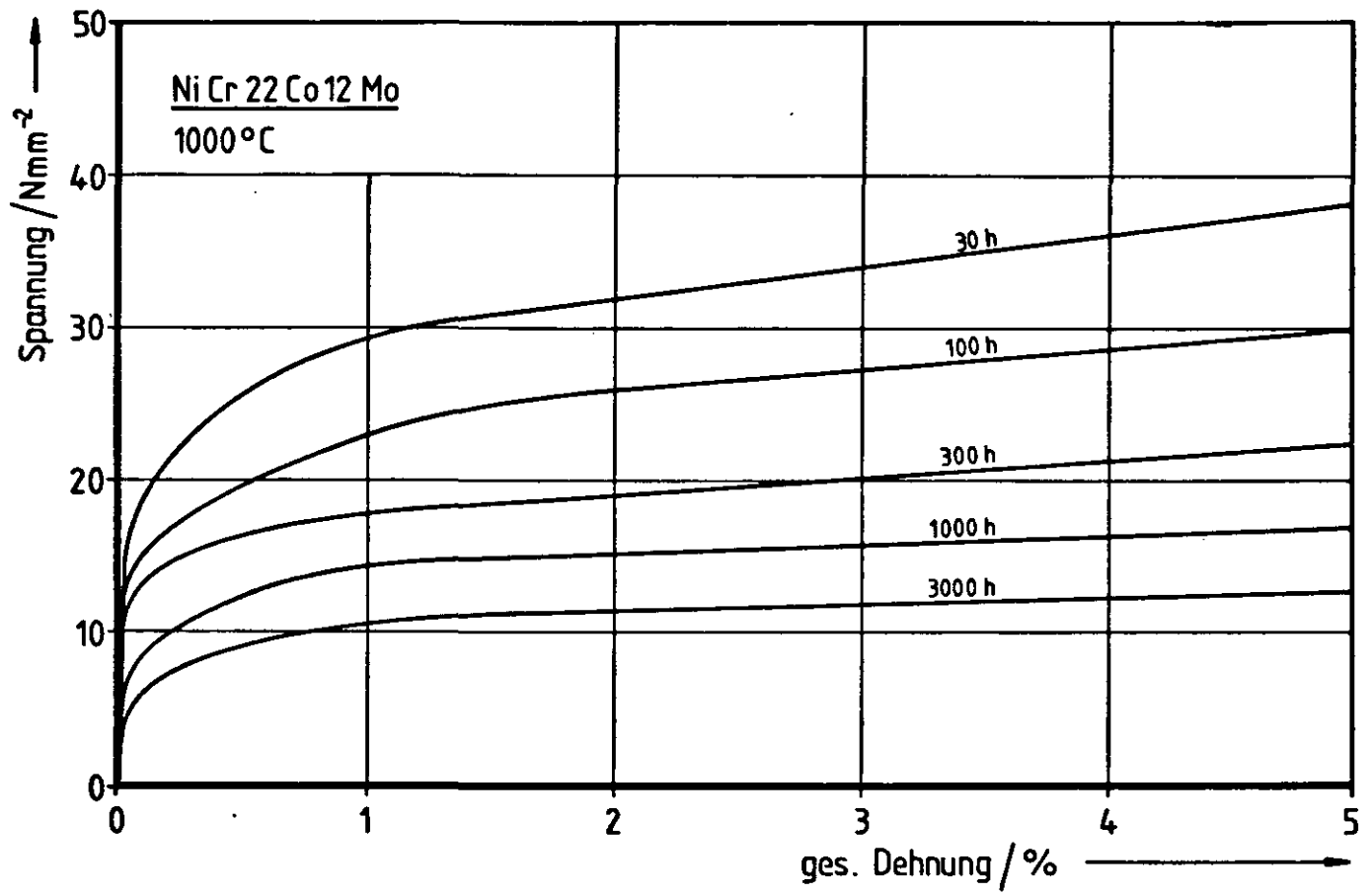
$$\text{minimale Kriechrate} = k \cdot \sigma^n$$

T (°C)	k (%h <sup>-1</sup> )	n
750	4,09 10 <sup>-20</sup>	7,73
800	1,86 10 <sup>-18</sup>	7,72
850	1,56 10 <sup>-16</sup>	7,68
900	1,98 10 <sup>-14</sup>	7,63
950	3,28 10 <sup>-12</sup>	7,44
1000	6,42 10 <sup>-10</sup>	6,87

## ZEITSTANDISOCHRONEN

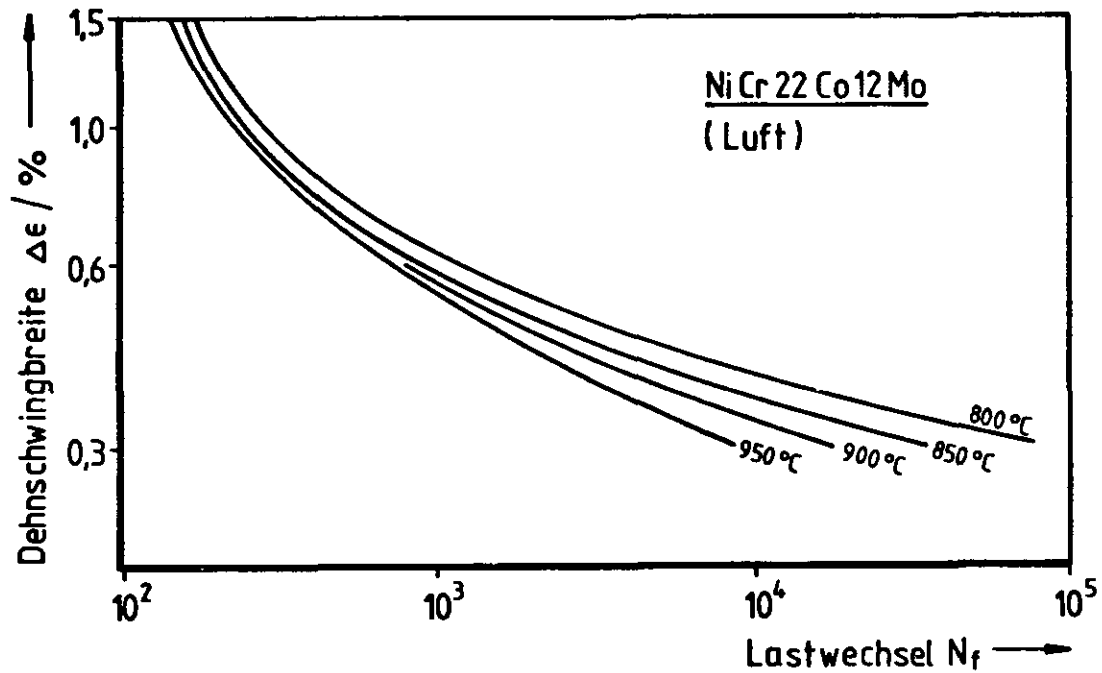




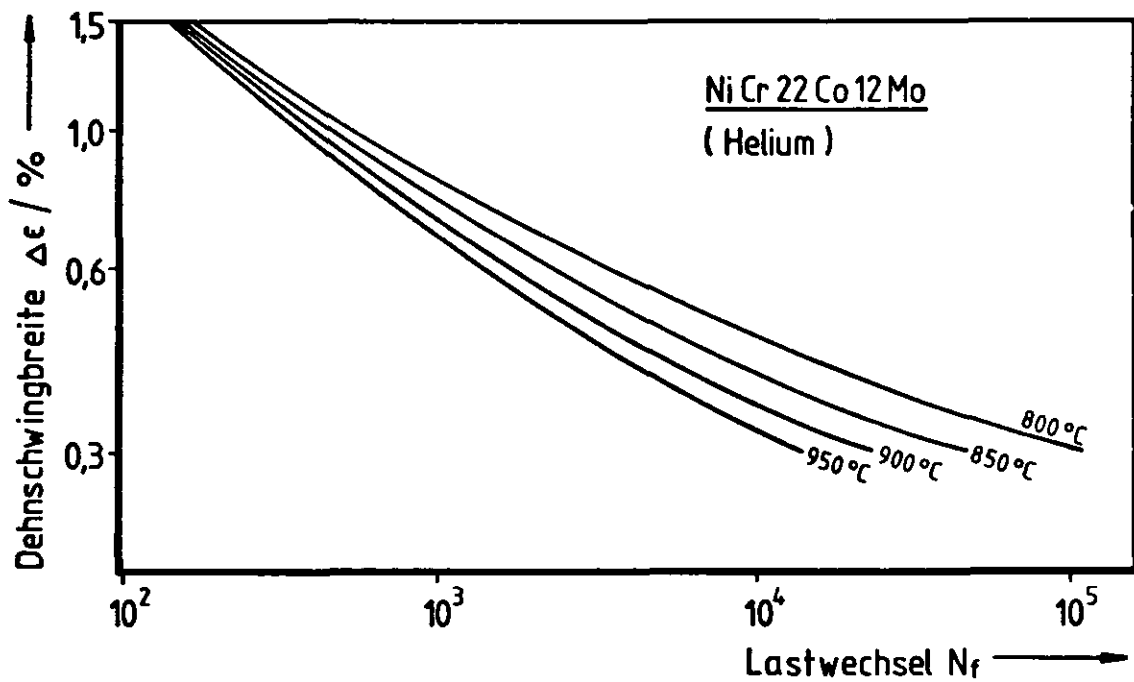


ERMÜDUNGSVERHALTEN

ERGEBNISSE AUS LCF-VERSUCHEN AN LUFT, DEHNUNGSGESTEUERT,  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



ERGEBNISSE AUS LCF-VERSUCHEN IN PNP-HELIUM, DEHNUNGSGESTEUERT,  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Mittelwerte, errechnet aus Ergebnissen von LCF-Versuchen im Rahmen des EG-HTR-Werkstoffprogramms.

KORROSIONSEIGENSCHAFTEN**PNP-HELIUM:**

800 - 900 °C: Ausbildung einer  $(Cr,Ti)_2O_3$  - Deckschicht; leichte Aufkohlung.

Bei  $H_2O$ -Gehalten der Atmosphäre  $\sim 0,5$  /ubar Bildung heterogener Oberflächenschichten ( $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $M_{23}C_6$ ), stärkere Aufkohlung.

$\geq 950$  °C: Bei  $H_2O$ -Gehalten  $\sim 1$  /ubar kann eine deutliche Entkohlung eintreten. Bei niedrigeren  $H_2O$ -Gehalten kommt es zur Bildung heterogener Deckschichten mit deutlicher Aufkohlung.

In extrem trockener Atmosphäre wird eine geschlossene  $Al_2O_3$  - Deckschicht gebildet.

Bei allen Temperaturen ergeben sich innere Oxydation von Al vorwiegend an den Korngrenzen und ausscheidungs-freie Zonen unter der Oberflächenschicht.

**PROZESSGAS:**

Ausbildung einer oxidischen Deckschicht auf Cr-Basis. Metallverlust durch Schichtbildung etwa  $8 \mu m$  nach 10.000 h bei  $950$  °C; Tiefe der inneren Oxydation  $\sim 50 \mu m$ .

<b>Datenblatt</b>	<b>2.4603</b>
<b>Stand: 1.1.1984</b>	<b>Ni Cr 22 Fe 18 Mo</b>

## ALLGEMEINES

Ni Cr 22 Fe 18 Mo ist eine Nickelbasislegierung mit hoher Festigkeit und hoher Korrosionsbeständigkeit.

Ni Cr 22 Fe 18 Mo findet Anwendung im Ofenbau, als Heißgasleitungen etc., sowie im Turbinenbau, z.B. bei Nachbrennerkomponenten und als Turbinenblätter.

Ni Cr 22 Fe 18 Mo ist erhältlich in Form von Blechen, Platten, Stangen, Draht und als Schweißelektroden.

Alle geschmiedeten Erzeugnisformen aus Ni Cr 22 Fe 18 Mo sind lösungsgeglüht bei  $1177 \pm 15^\circ\text{C}$  mit anschließender Abkühlung in Luft oder Wasser.

Auslegungsdaten für Ni Cr 22 Fe 18 Mo in Form von Blechen, Platten und Stangen sind im ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Div. I (Rules for Construction and Design) für Auslegungstemperaturen bis  $898^\circ\text{C}$  zusammengefaßt.

## BEZEICHNUNGEN

NORM, HERSTELLER	BEZEICHNUNGEN
DIN-Bezeichnung	Ni Cr 22 Fe 18 Mo
Werkstoffnummer (VdEH)	2.4603 (2.4665 für Nimonic PE 13)
Cabot Corp.	HASTELLOY alloy X
Henry Wiggin, U.K.	Nimonic PE 13

## CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Gew- %				Gew- %			
	min.	-	max.		min.	-	max.
C	0,05	-	0,12	Si		<	1,0
Fe	17,0	-	20,0	Al		<	0,1
Cr	20,5	-	23,0	W	0,2	-	1,0
Ni	Bal.	-	45,0	S		<	0,015
Mo	8,0	-	10,0	P		<	0,015
Mn		<	1,0	N	0,03	-	0,05
Co	1,5	-	2,5	B	0,002	-	0,005

(Angaben nach IA-Bericht 55.3389.4 "A")

VORSCHRIFTEN FÜR HERSTELLUNG, WÄRMEBEHANDLUNG UND KORNGRÖSSEN**A) HERSTELLUNG:**

Gußformen:	Sand- und Feinguß (Wachs-Ausschmelz-Verfahren)
Schmiedestücke:	gleichmäßig schmiedbar und kalt verformbar
Schweißungen:	Schweißbarkeit mit Schweißzusätzen gleicher Zusammensetzung wie Grundmaterial (Schweißzusätze in Form von Stangen, umhüllten Schweißelektroden und Drähten).

**B) WÄRMEBEHANDLUNG:**

Lösungsglühen bei  $1177 \pm 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , schnelle Abkühlung in Luft oder Wasser.

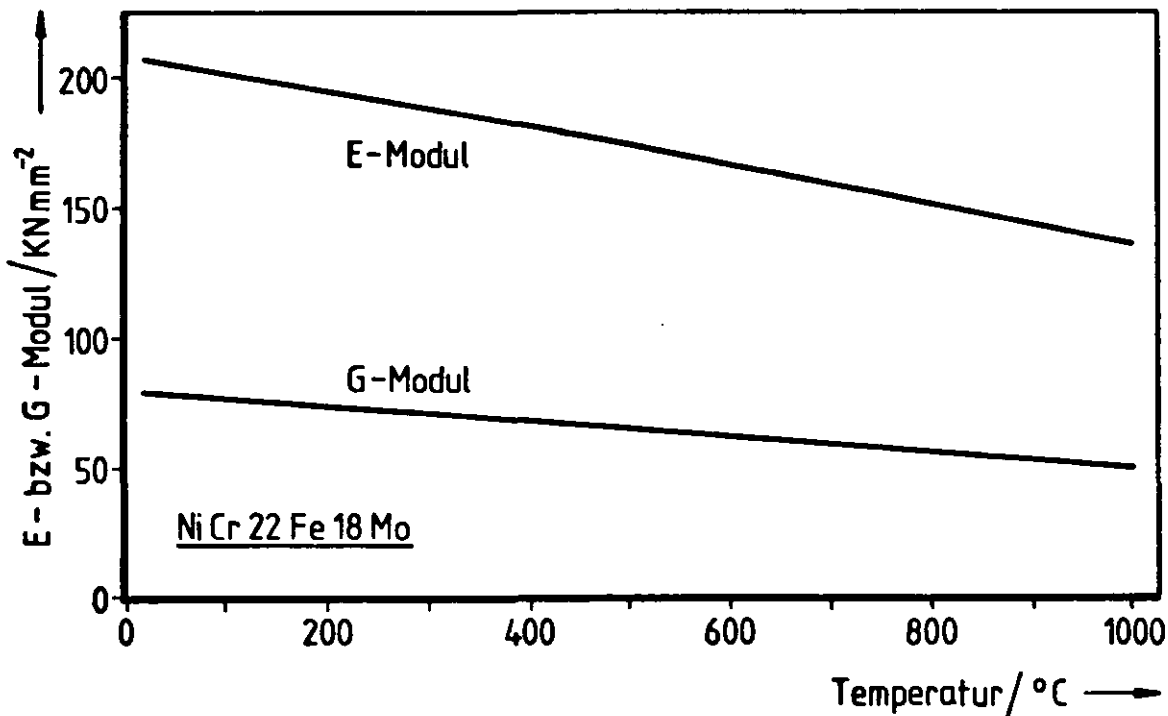
**C) VORHANDENE SPEZIFIKATIONEN:**

ASTM:	B 435, B 572
ASME:	SB-435, SB-572
ASM:	5536, 5587, 5588, 5754

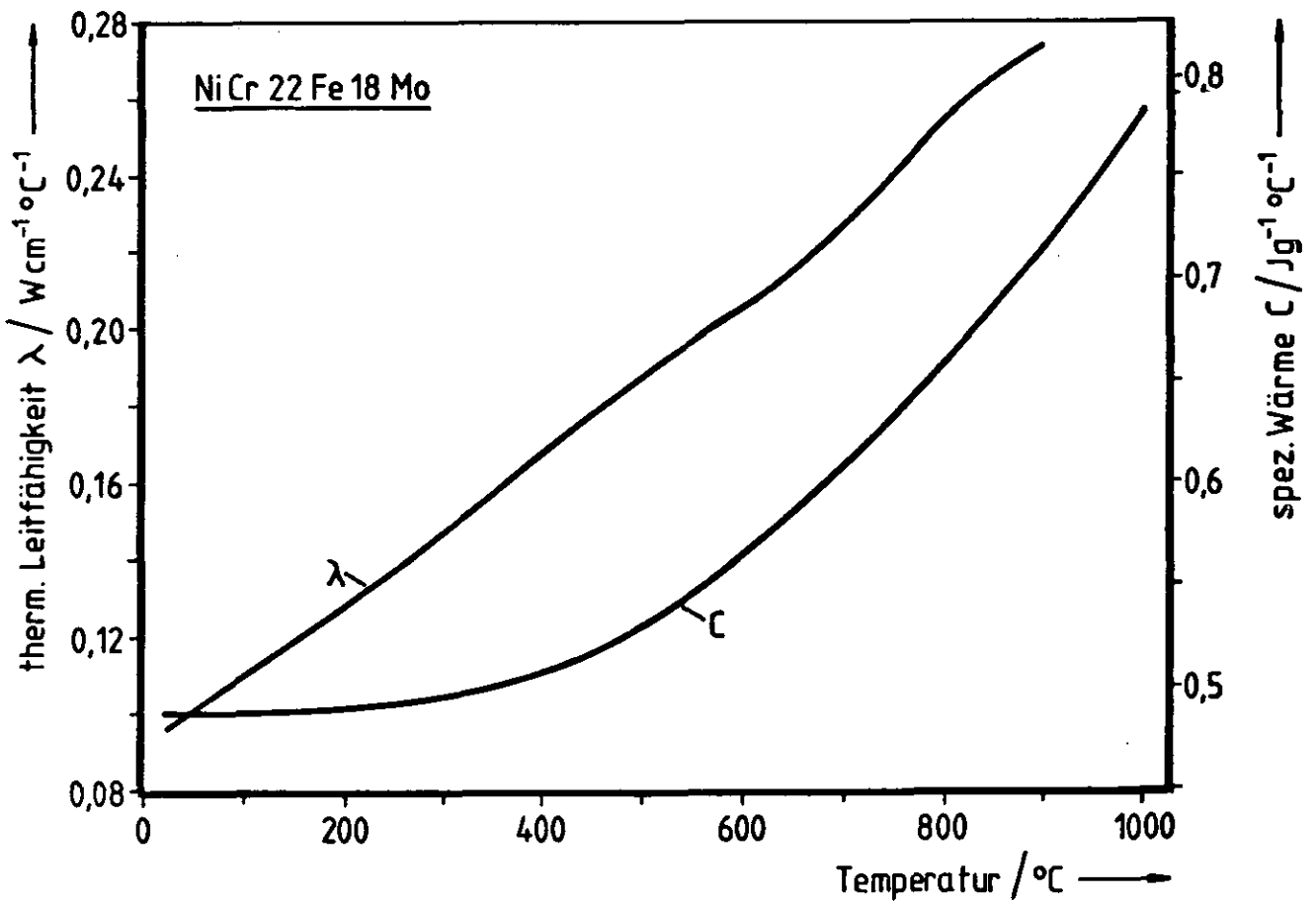
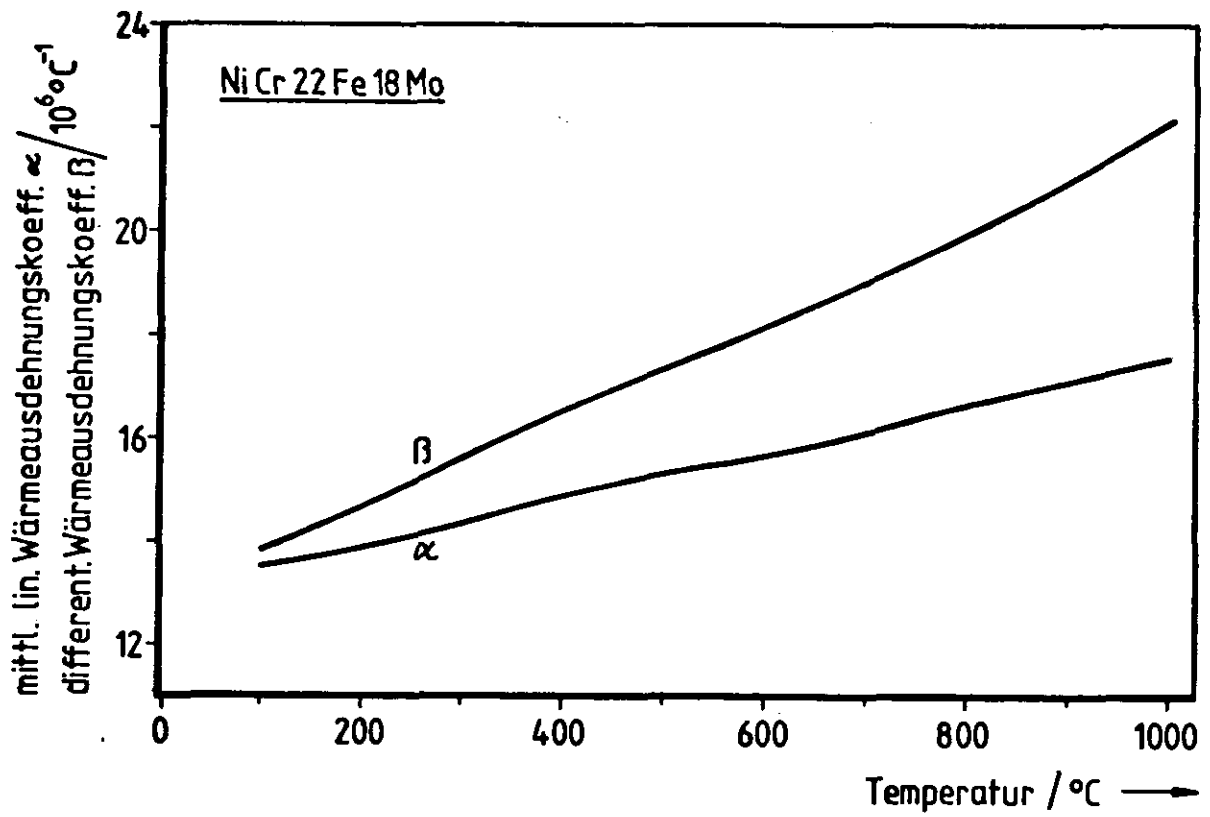
Für Anwendungen in NPW-Anlagen liegt der Entwurf einer PNP-Spezifikation vor (IA-Notiz 55.4099.0"B")

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Dichte:	$8,23 \text{ gcm}^{-3}$
Schmelztemperatur:	$1260 - 1335 \text{ }^{\circ}\text{C}$

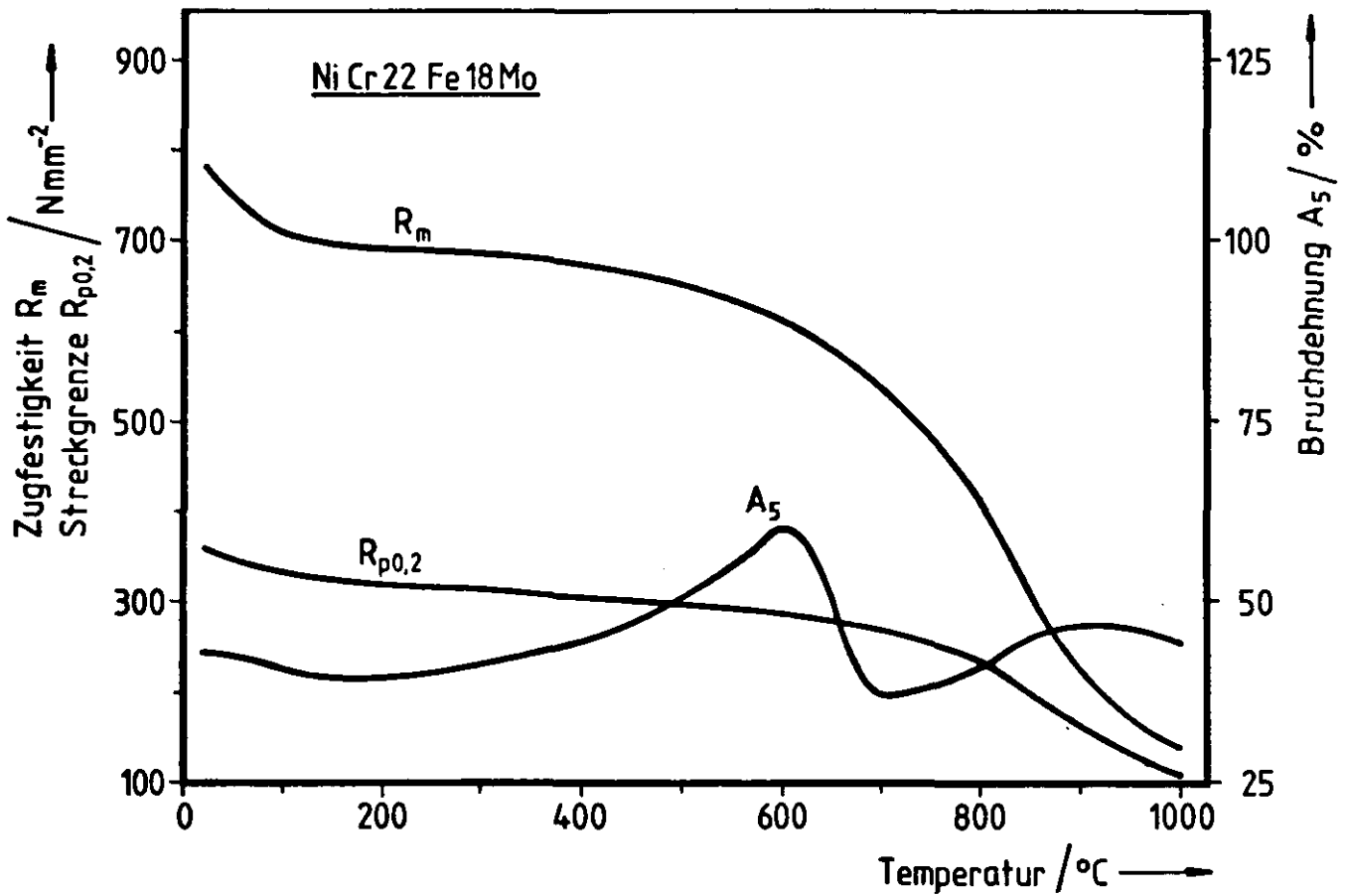






MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

ERGEBNISSE AUS ZUGVERSUCHEN IM ANLIEFERUNGSZUSTAND

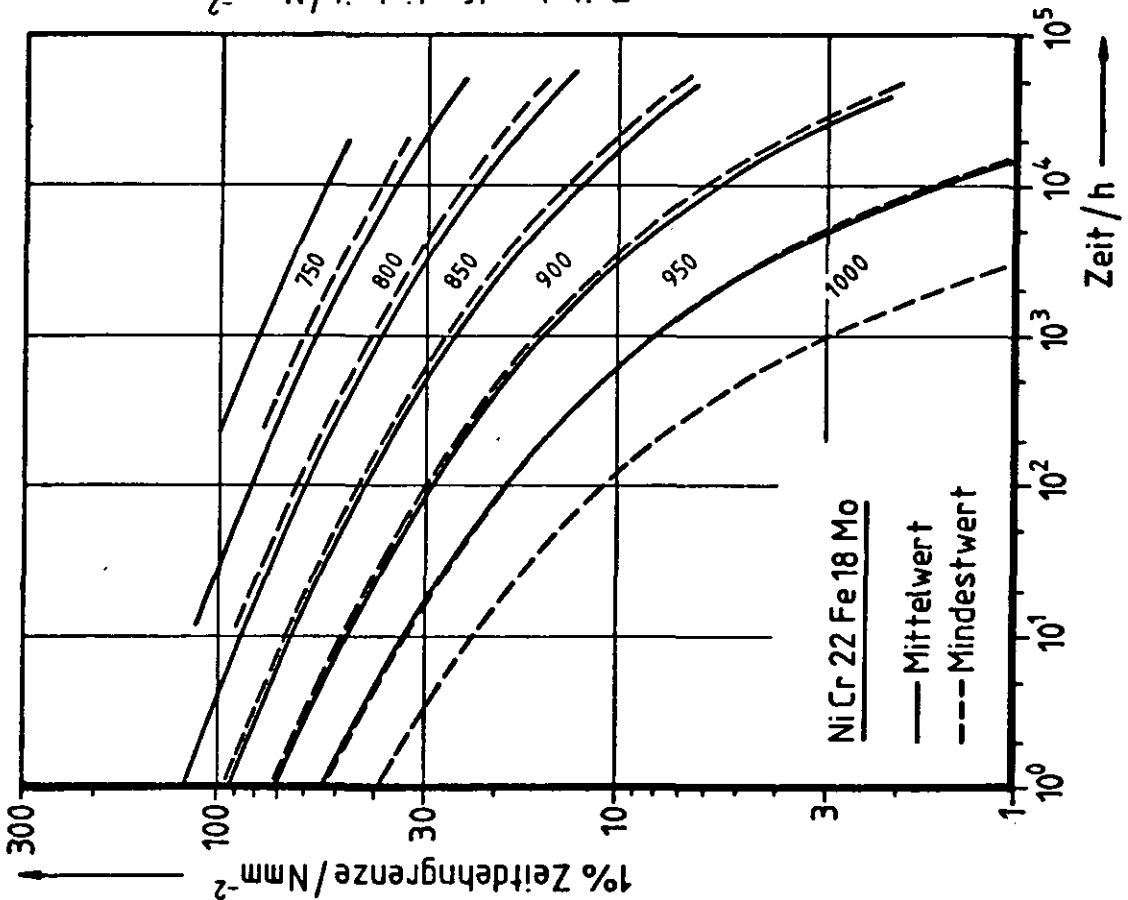
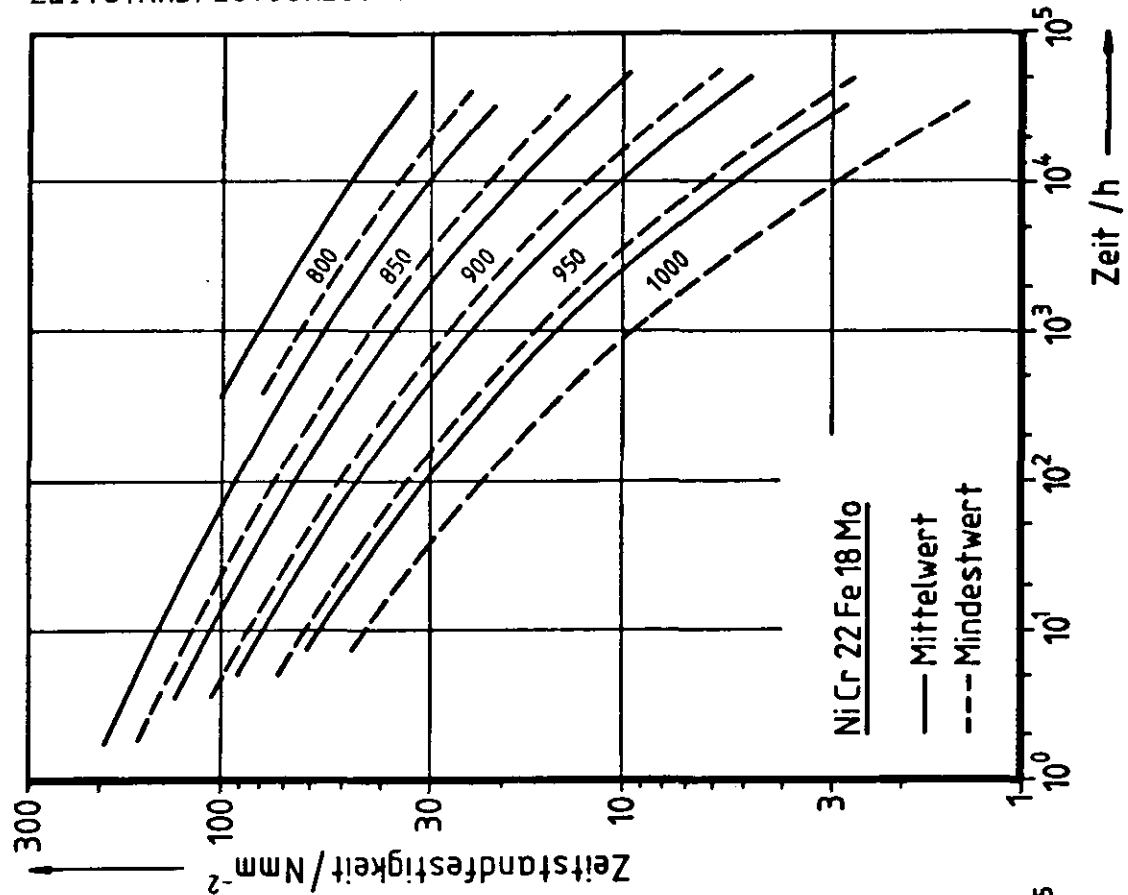


## Herstellerangaben

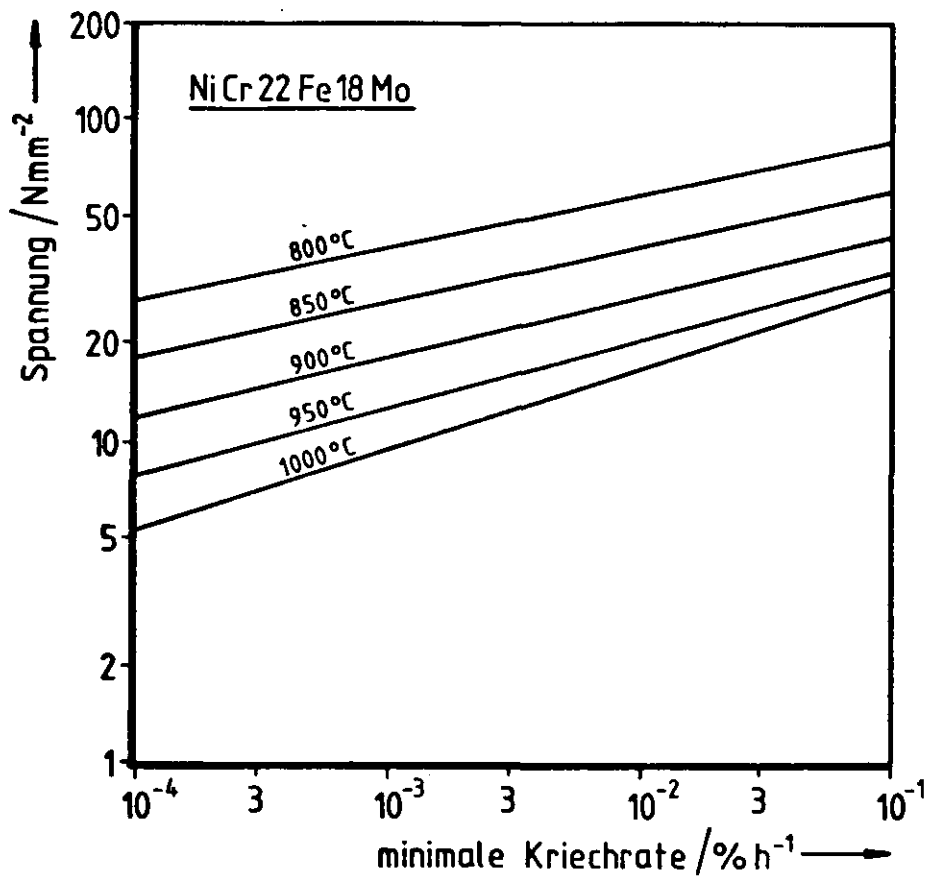
Mit zunehmender Temperatur werden Ergebnisse aus Warmzugversuchen abhängig von der Abzugsgeschwindigkeit, mit der der Zugversuch gefahren wird. Die Angaben über die 0,2%-Dehngrenze und die Zugfestigkeit können daher nur einen ungefähren Anhaltspunkt darstellen.

ZEITSTANDVERHALTEN

## ZEITSTANDFESTIGKEIT UND 1% - ZEITDEHNGRENZE



## KRIECHDATEN

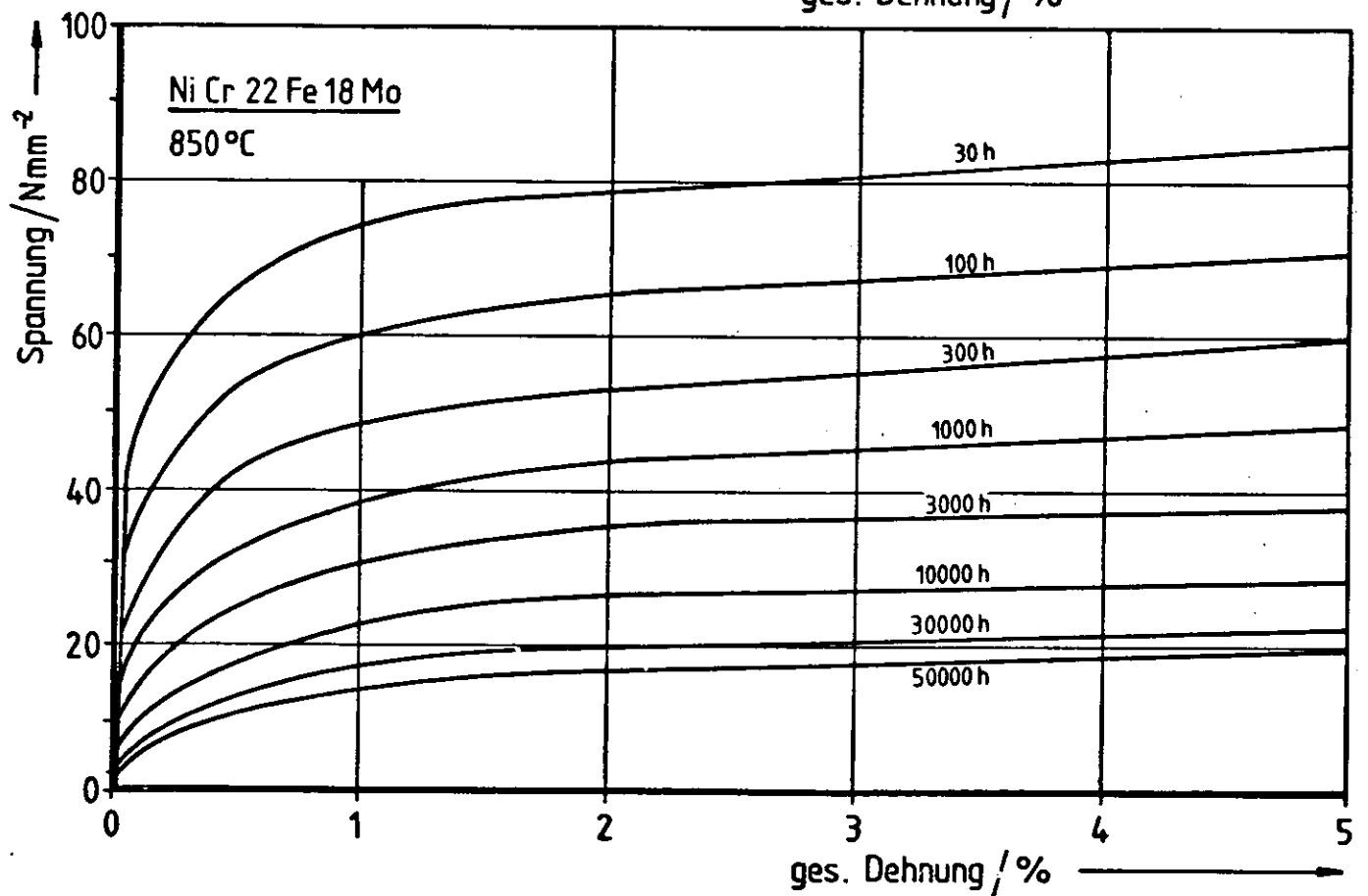
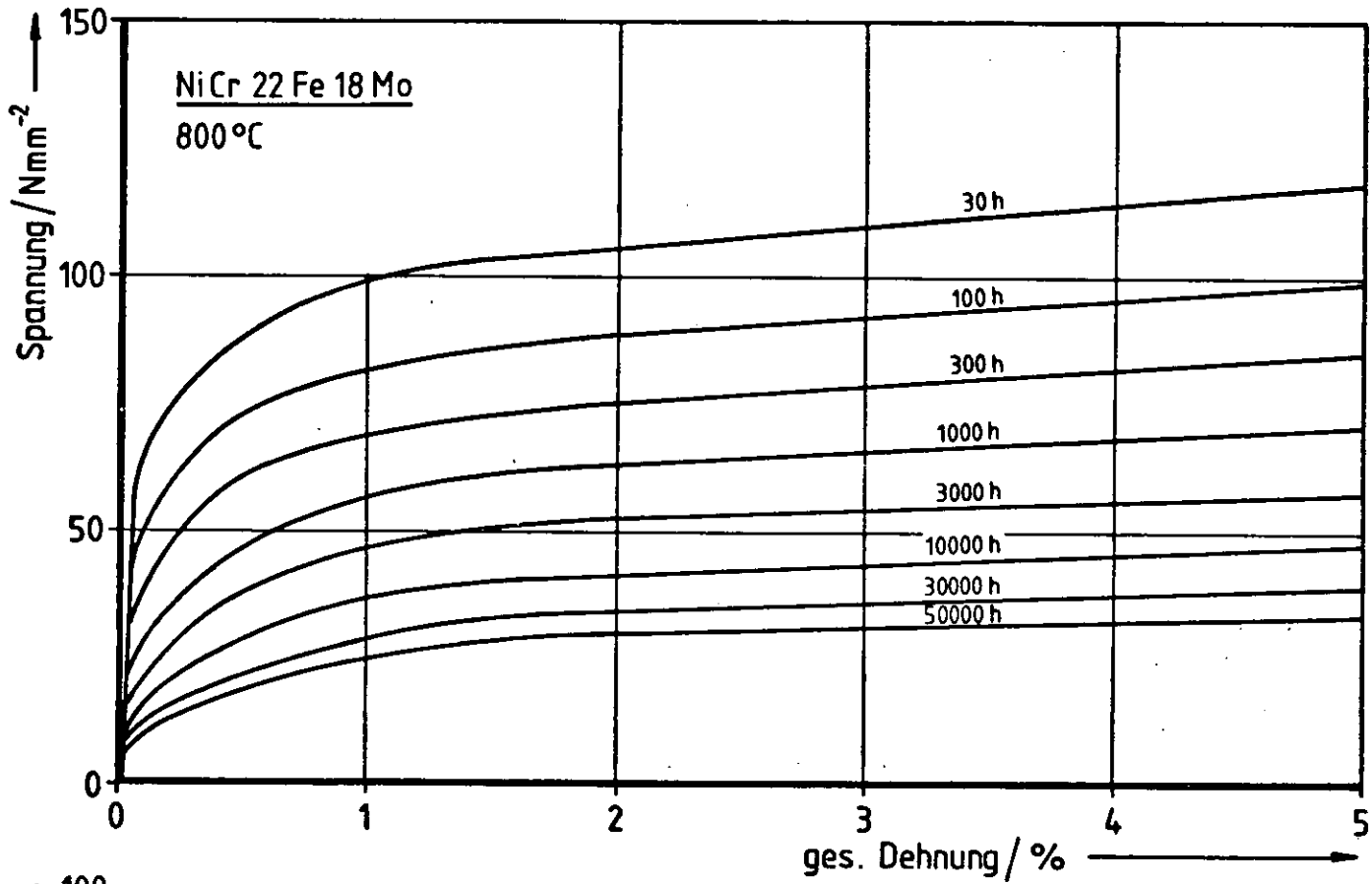


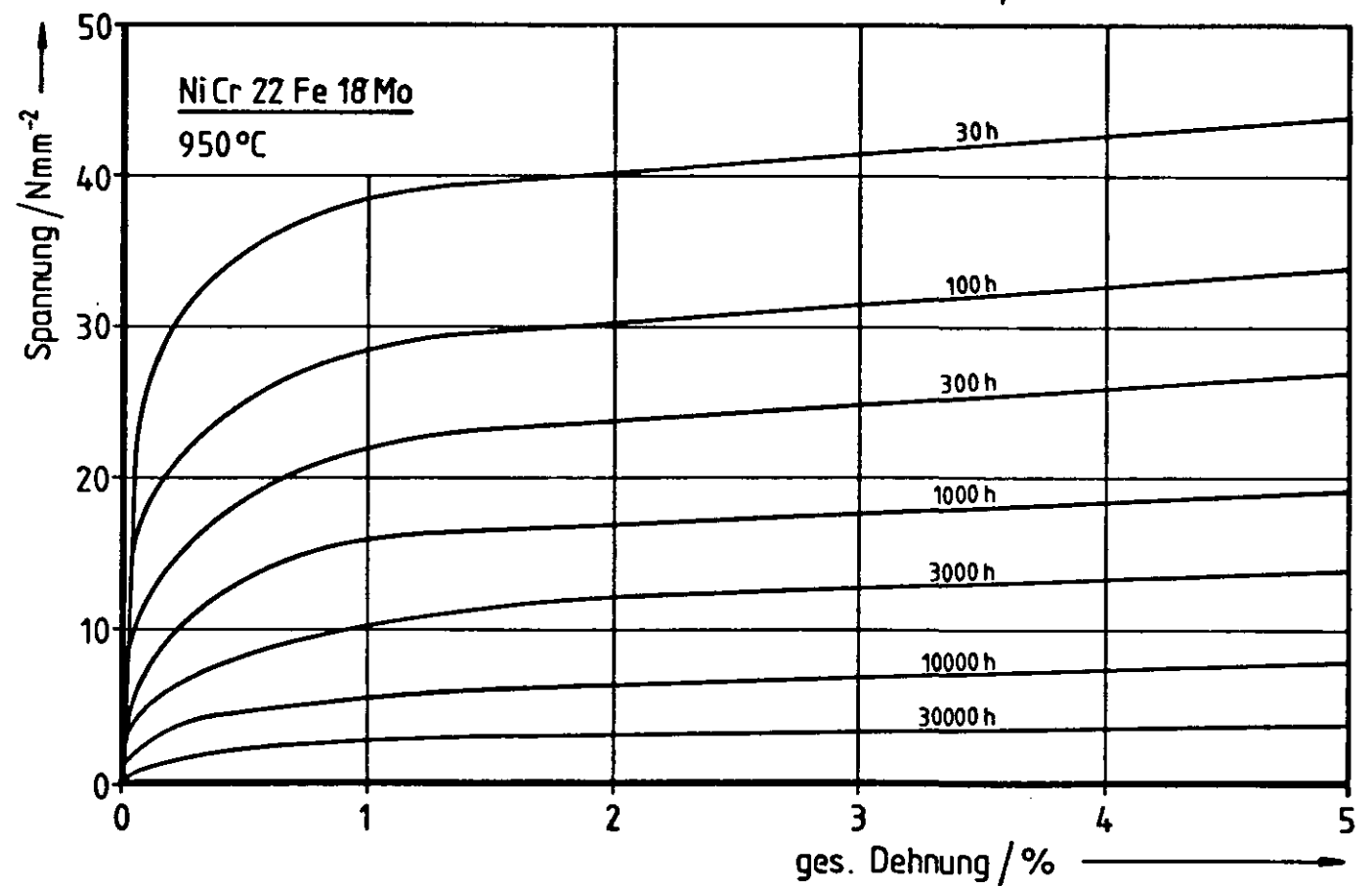
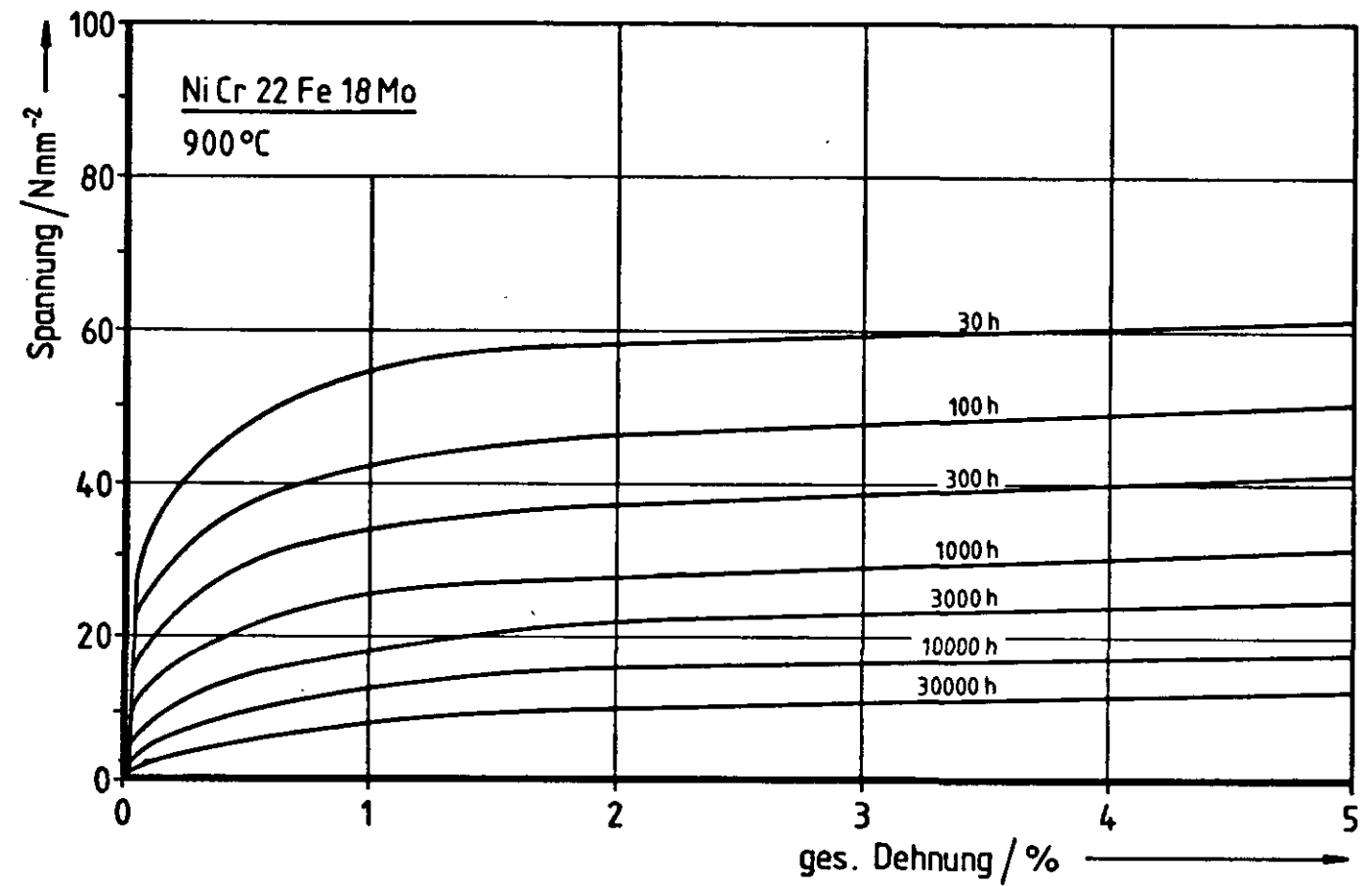
Interpolierte Werte, ermittelt aus den Ergebnissen des EG-HTR-Werkstoffprogramms und aus Herstellerangaben über Kriechversuche an Luft. Je nach Versuchsschmelze können die k- und n-Werte um bis zu 50% von den angegebenen Mittelwerten abweicht.

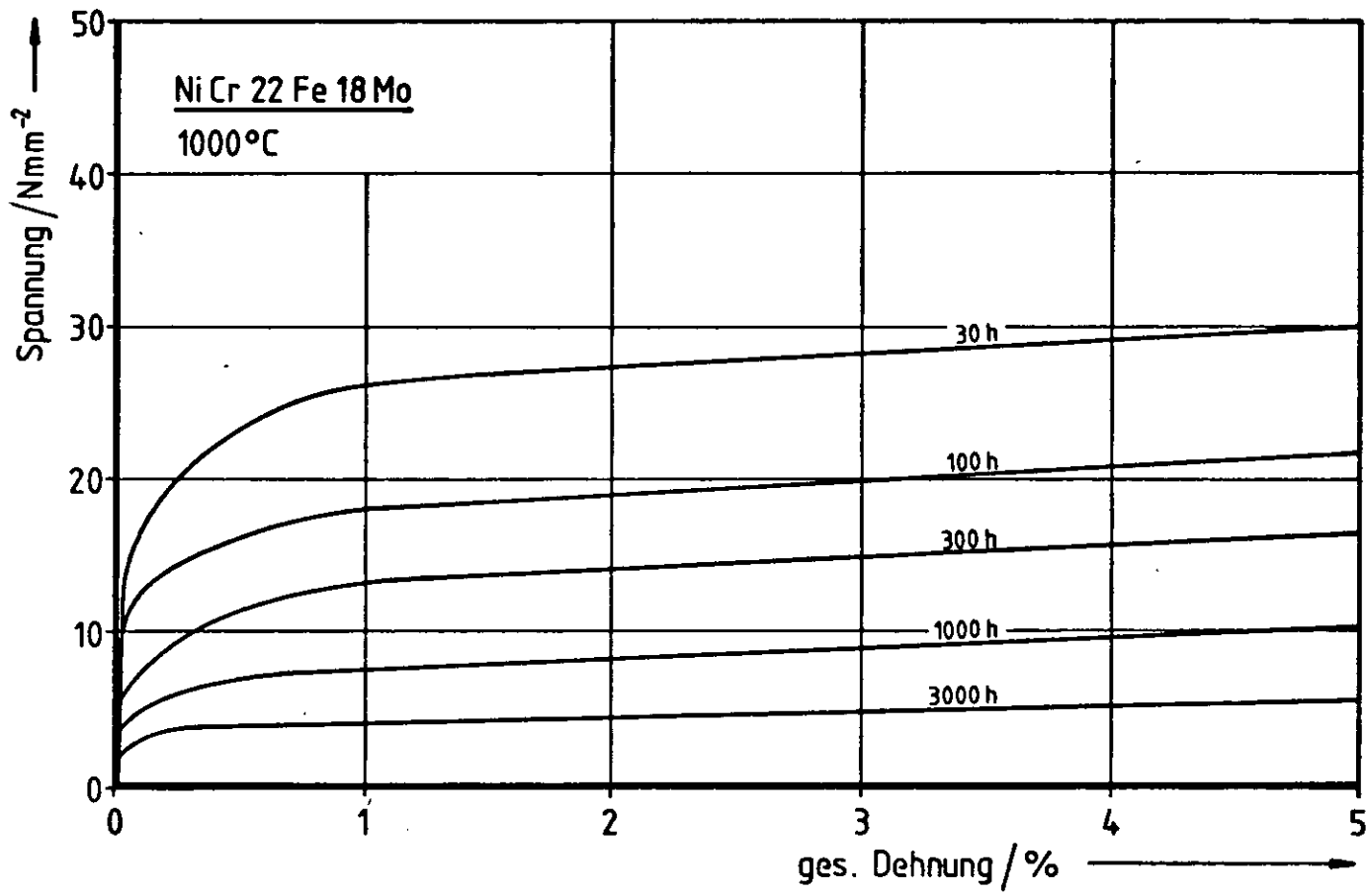
$$\text{minimale Kriechrate} = k \cdot \sigma^n$$

T (°C)	k (%h <sup>-1</sup> )	n
750	3,75 10 <sup>-15</sup>	6,29
800	2,23 10 <sup>-13</sup>	5,97
850	9,23 10 <sup>-12</sup>	5,60
900	2,78 10 <sup>-10</sup>	5,20
950	6,34 10 <sup>-9</sup>	4,68
1000	1,13 10 <sup>-7</sup>	4,00

## ZEITSTANDISOCHRONEN

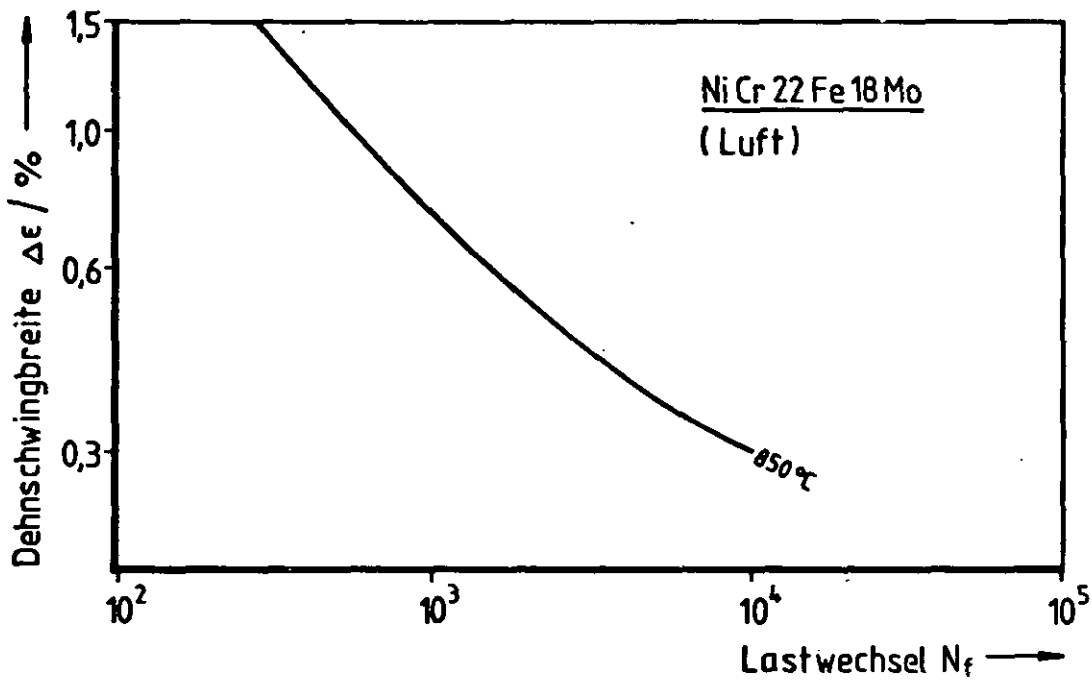






ERMÜDUNGSVERHALTEN

ERGEBNISSE AUS LCF-VERSUCHEN AN LUFT, DEHNUNGSGESTEUERT,  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Mittelwerte, errechnet aus Ergebnissen von LCF-Versuchen im Rahmen des EG-HTR-Werkstoffprogramms.



KORROSIONSEIGENSCHAFTEN**PNP-HELIUM:**

800 - 900 °C: Bildung einer oxidischen Deckschicht ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrMnO}_4$ ), leichte Aufkohlung

Bei  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalten der Atmosphäre  $\leq 0,5$  ubar tritt oberhalb 850 °C die Bildung heterogener Deckschichten auf ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{M}_3\text{O}_4$ ,  $\text{M}_6\text{C}$ ,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ), verbunden mit stärkerer Aufkohlung.

$\geq 950$  °C: Bei hohen Feuchtegehalten und niedrigen CO-Gehalten ( $\leq 10$  ubar) kann leichte Entkohlung auftreten.

Bei allen Temperaturen ergeben sich geringe transkristalline innere Oxydation und nur minimale ausscheidungsfreie Zonen unter der Oberfläche.

**PROZESSGAS:**

Bildung einer oxidischen Deckschicht auf Cr/Mn - Basis  
Metallverlust durch Deckschichtbildung etwa  $6 \mu\text{m}$   
nach 10.000 h bei 950 °C.

Sehr geringe transkristalline innere Oxydation.

<b>Datenblatt</b>	<b>1.4876</b>
<b>Stand: 1.1.1984</b>	<b>X 10 Ni Cr Al Ti 32 20</b>

## ALLGEMEINES

X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 ist eine Eisen-Nickel-Chrom-Legierung mit hoher Festigkeit und guter Beständigkeit gegen Oxydation und Aufkohlung.

X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 findet Anwendung im Bereich chemischer Anlagen, als Wärmetauscherrohre und im Ofenbau. In Nuklearanlagen wird X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 z.B. angewendet für Dampferzeugerrohre (LWRs, Super Phenix), Überhitzer und Hüllrohre für Regelstäbe (HTGR in Fort St. Vrain).

X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 ist erhältlich in Form von Blechen, Platten, Stangen, Rohren und als Schmiedestücke.

Erzeugnisformen aus X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 sind im lösungsgeglühten oder weichgeglühten Zustand lieferbar.

Auslegungsdaten für X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 finden sich im "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", -Case 1325-7, -Special Case 1342, -Case 1592 und -Case N 47 für Anwendungstemperaturen von bis zu 814°C. Begutachtungsergebnisse im Sinne der technischen Regeln für überwachungsbedürftige Anlagen (TRD, TRB, AD-Merkblätter, TRG, TRbF) finden sich im VdTÜV-Werkstoffblatt 434 (Stand 1.81).

## BEZEICHNUNGEN

NORM , HERSTELLER	BEZEICHNUNG
DIN - Bezeichnung	X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 (H)
Werkstoffnummer (VdEH)	1.4876
Henry Wiggin, U.K.	INCOLOY alloy 800 H
Huntington Alloys Inc.	INCOLOY alloy 800 H
Mannesmann Röhrenwerke	nach Werkstoffnummer
Schmidt u. Clemens	Märker 4876 (G)
TEW	Thermax 4876 (G)
VDM	Nicrofer 3220 H
Krupp Hüttenwerke	Ferrotherm 4876
Böhler	4876.0 Böhler H500
Pose - Marré	Pyrotherm 20/33 Al Ti
VEW - Wien	H 500 (H 504)
Sandvik - Schweden	Sanicro 31 H

(G) gilt für weichgeglühte Erzeugnisformen, sonst lösungsgeglüht.

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Gew- %				Gew- %			
	min.	-	max.		min.	-	max.
C	0,05	-	0,1	Si		<	1,0
Fe	Bal	-	50	Al	0,15	-	0,6
Cr	19	-	23	Ti	0,15	-	0,6
Ni	30	-	35	S		<	0,015
Mo				P			
Mn		<	1,5	N			
Cu		<	0,75	B			

(Angaben aus Stahlschlüssel)

VORSCHRIFTEN FÜR HERSTELLUNG, WÄRMEBEHANDLUNG UND KORNGRÖSSE**A) HERSTELLUNG:**

Erschmelzung: Elektrolichtbogenofen-Verfahren oder Induktionsofen-Verfahren, ggfs. Vakuumerschmelzung.

Schmiedestücke: Gleichmäßig schmiedbar und kalt verformbar. Warmumformung oberhalb 870 °C (bis etwa 1200 °C). der Temperaturbereich von 650 °C bis 870 °C kann bei Warmumformung zu Rissen im Schmiedestück führen.

Schweißungen: Schweißbarkeit mit verschiedenen Schweißzusätzen je nach Einsatztemperatur der Schweißnaht. Alle Schweißverfahren anwendbar.

**B) WÄRMEBEHANDLUNG:**

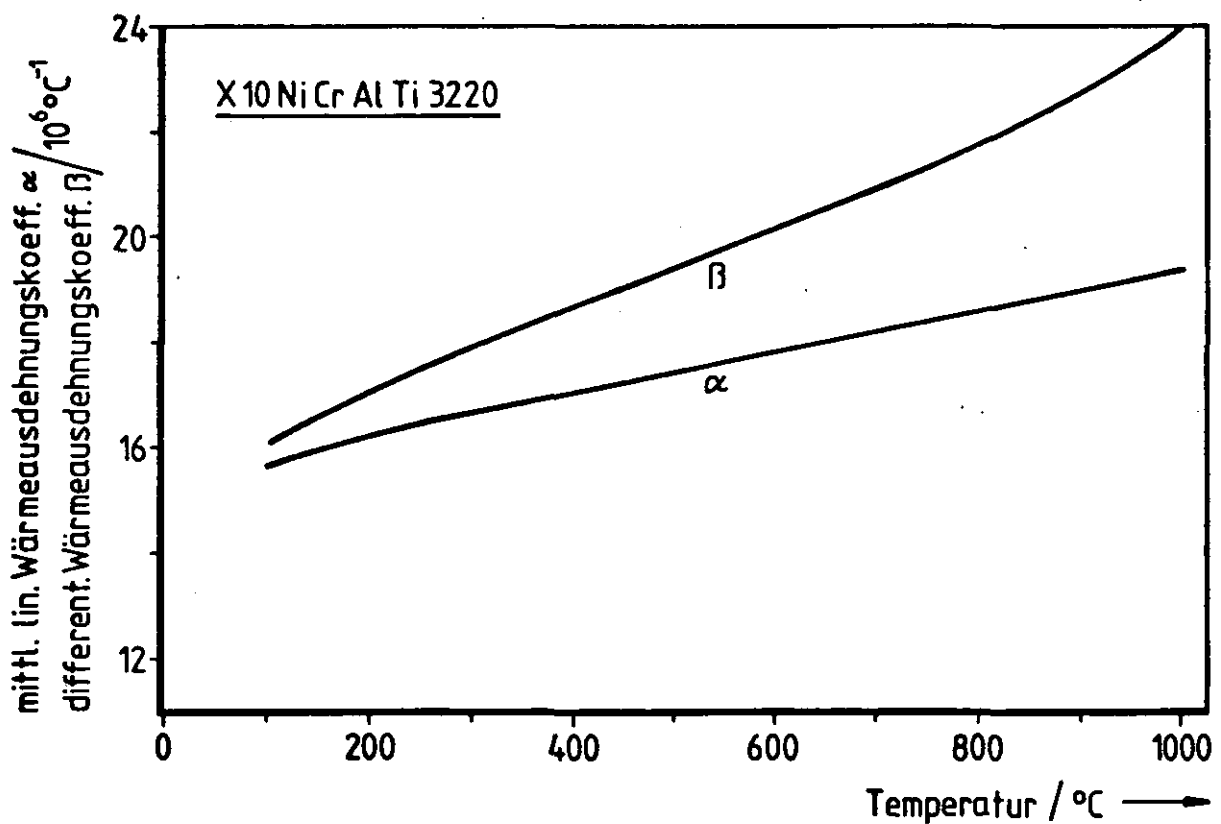
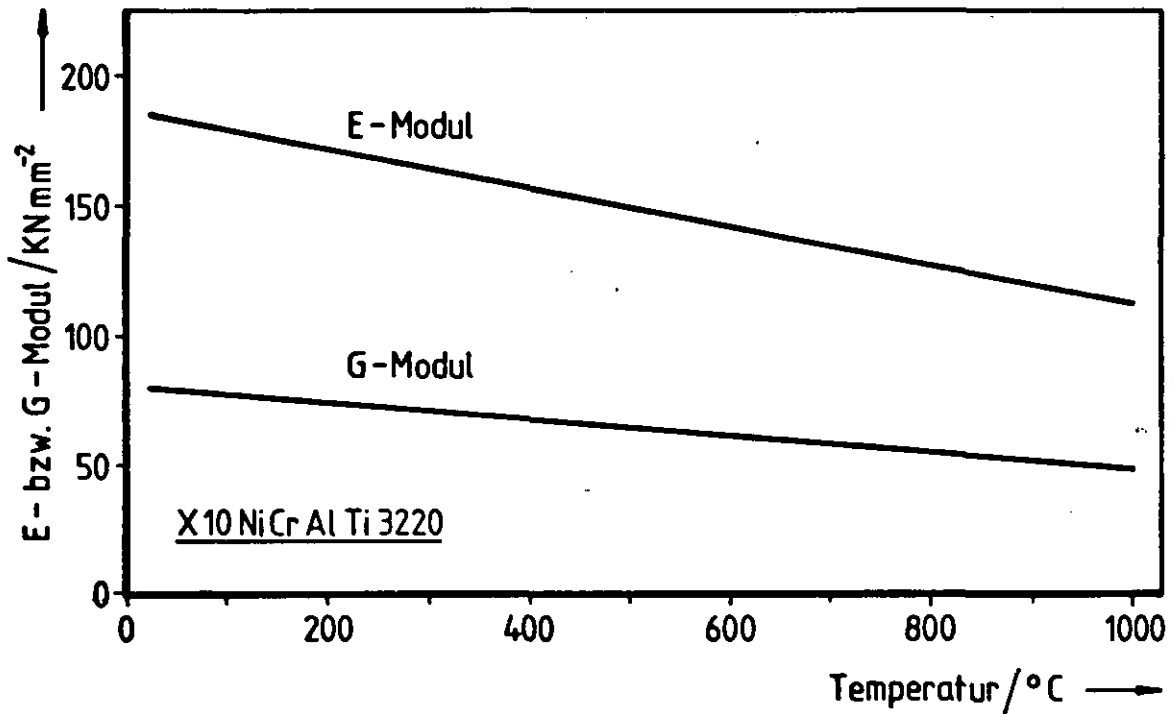
Standard: Lösungsglühen bei 1135 ±15 °C für 1 bis 2 h, rasche Abkühlung in Luft oder Wasser.  
Weichglühen oberhalb 760 °C; zweckmäßig bei 980 °C für 10 bis 15 min.  
Beim Abkühlen ist der Bereich von 540 °C bis 760 °C möglichst rasch zu durchfahren, um Karbidbildung zu vermeiden.

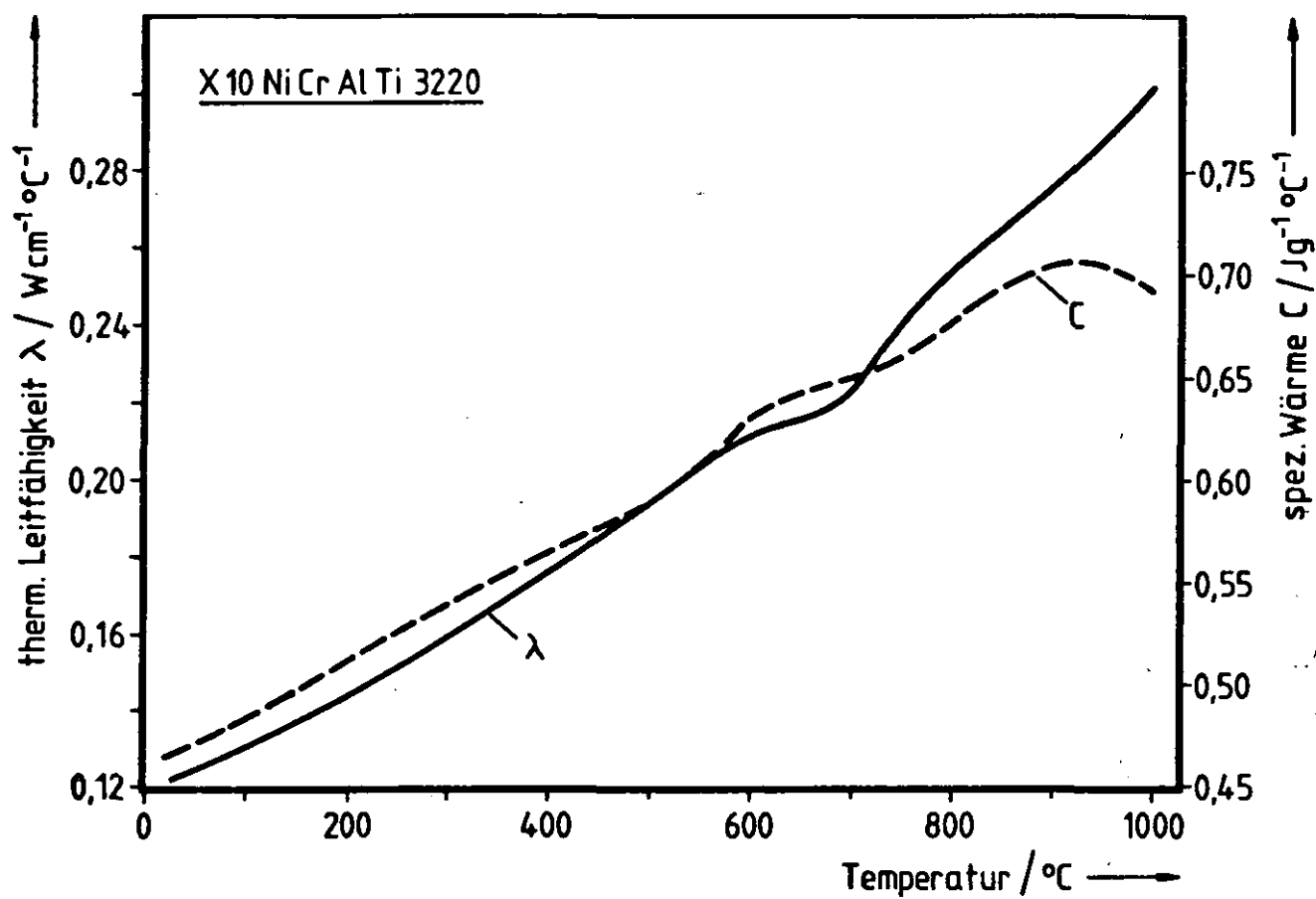
**C) VORHANDENE SPEZIFIKATIONEN:**

ASTM: B 163, B 407, B 408, B 409, B 514, B 515  
ASME: SB-163, SB-407, SB-408, SB-409  
ASM: 5766, 5871

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTENDichte: 8,02 gcm<sup>-3</sup>

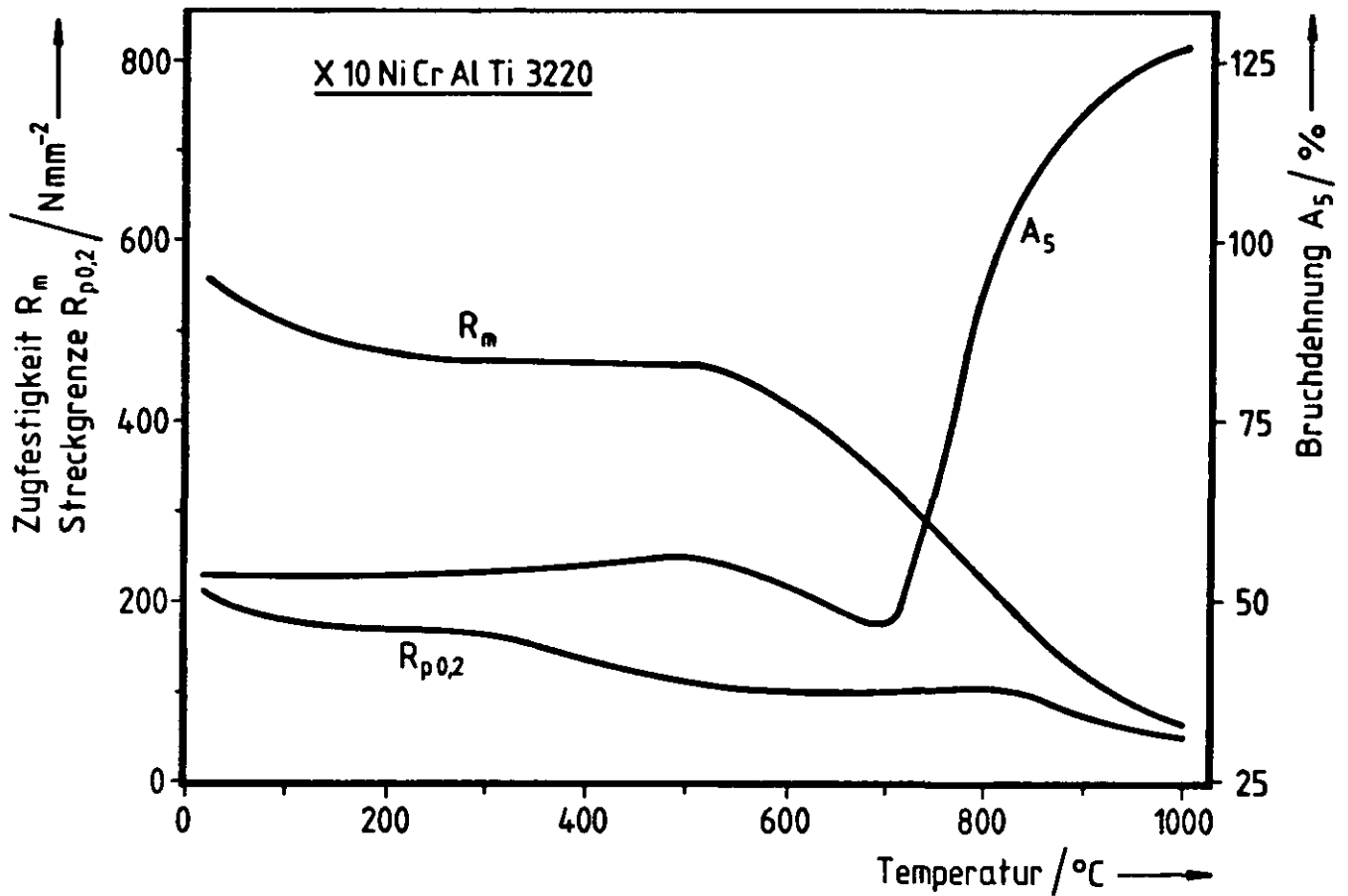
Schmelztemperatur: 1355 - 1385 °C





MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

ERGEBNISSE AUS ZUGVERSUCHEN IM ANLIEFERUNGSZUSTAND

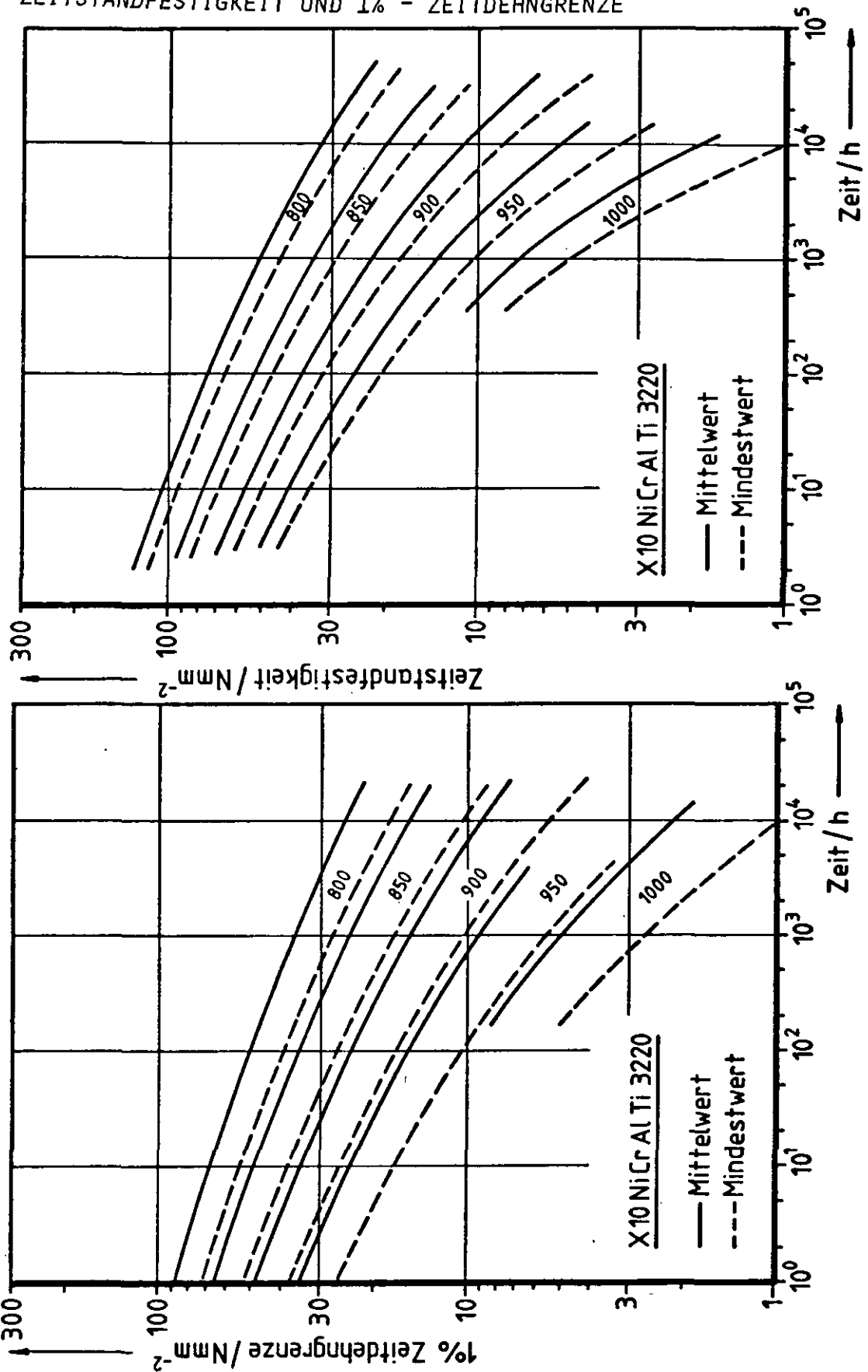


Herstellerangaben

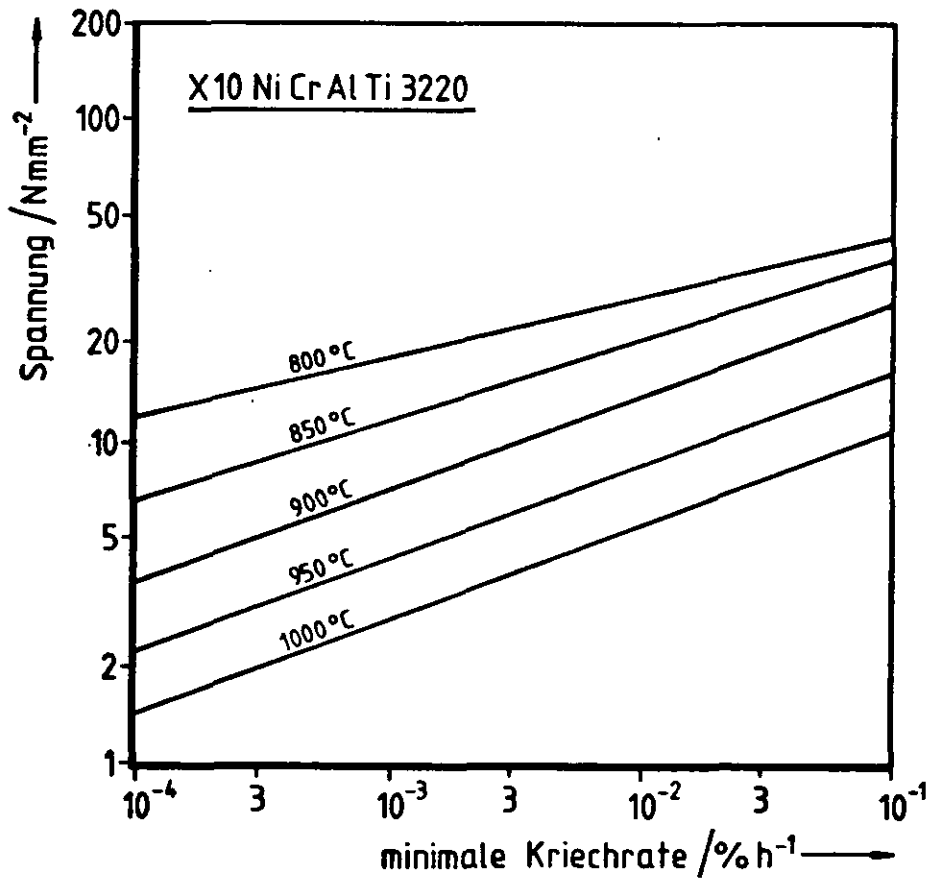
Mit zunehmender Temperatur werden Ergebnisse aus Warmzugversuchen abhängig von der Abzugsgeschwindigkeit, mit der der Zugversuch gefahren wird. Die Angaben über die 0,2%-Dehngrenze und Zugfestigkeit können daher nur einen ungefähren Anhaltspunkt darstellen.

## ZEITSTANDVERHALTEN

## ZEITSTANDFESTIGKEIT UND 1% - ZEITDEHNGRENZE



## KRIECHDATEN



Interpolierte Werte, ermittelt aus Ergebnissen des EG-HTR-Werkstoffprogramms und aus Herstellerangaben über Kriechversuche an Luft. Je nach Versuchsschmelze können die  $k$ - und  $n$ -Werte um bis zu 50% von den angegebenen Mittelwerten abweichen.

$$\text{minimale Kriechrate} = k \cdot \sigma^n$$

T (°C)	k (%h <sup>-1</sup> )	n
750	6,00 10 <sup>-14</sup>	7,2
800	1,87 10 <sup>-10</sup>	5,3
850	5,02 10 <sup>-8</sup>	4,0
900	1,09 10 <sup>-6</sup>	3,42
950	6,61 10 <sup>-6</sup>	3,48
1000	2,82 10 <sup>-5</sup>	3,4

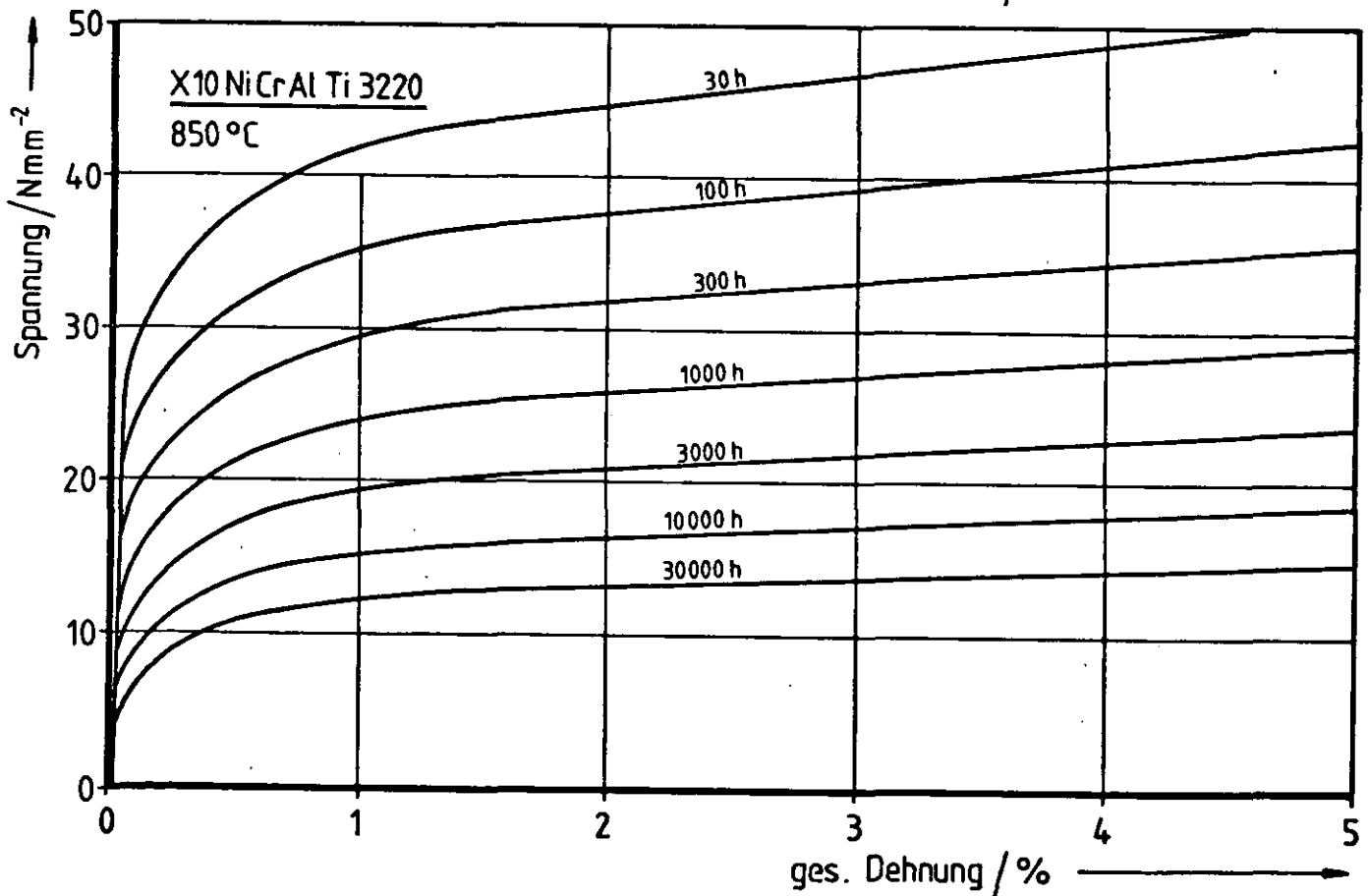
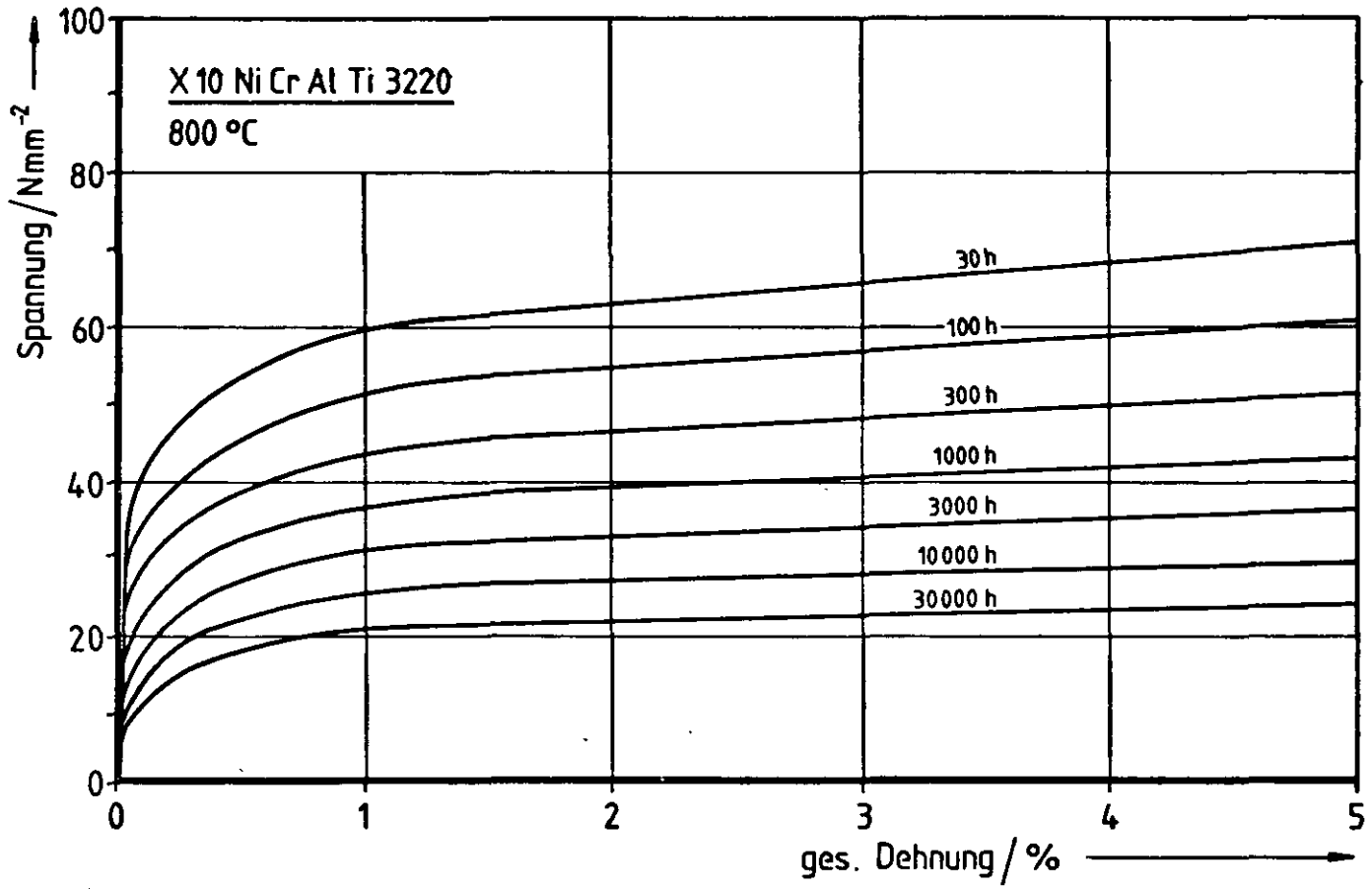


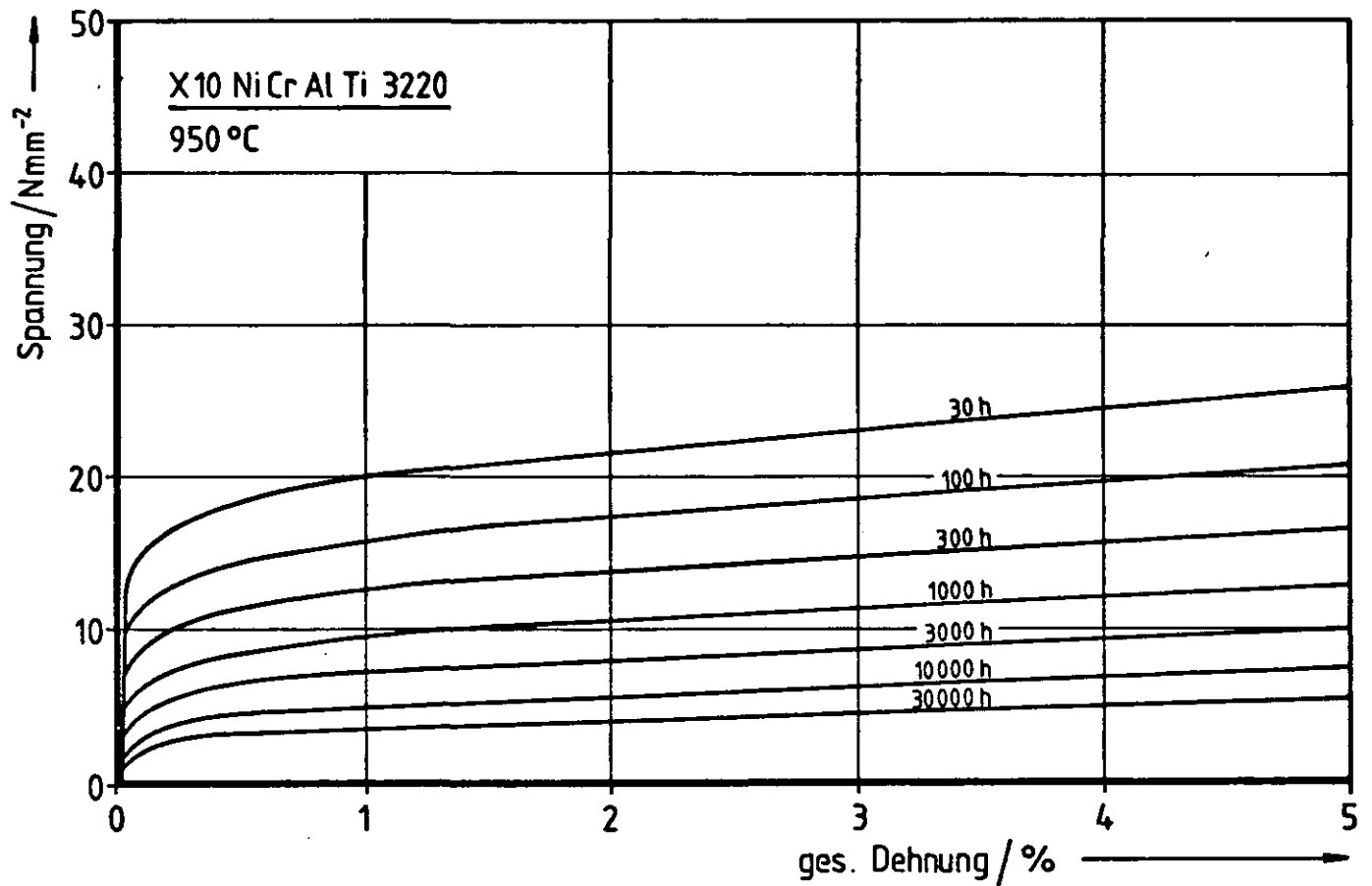
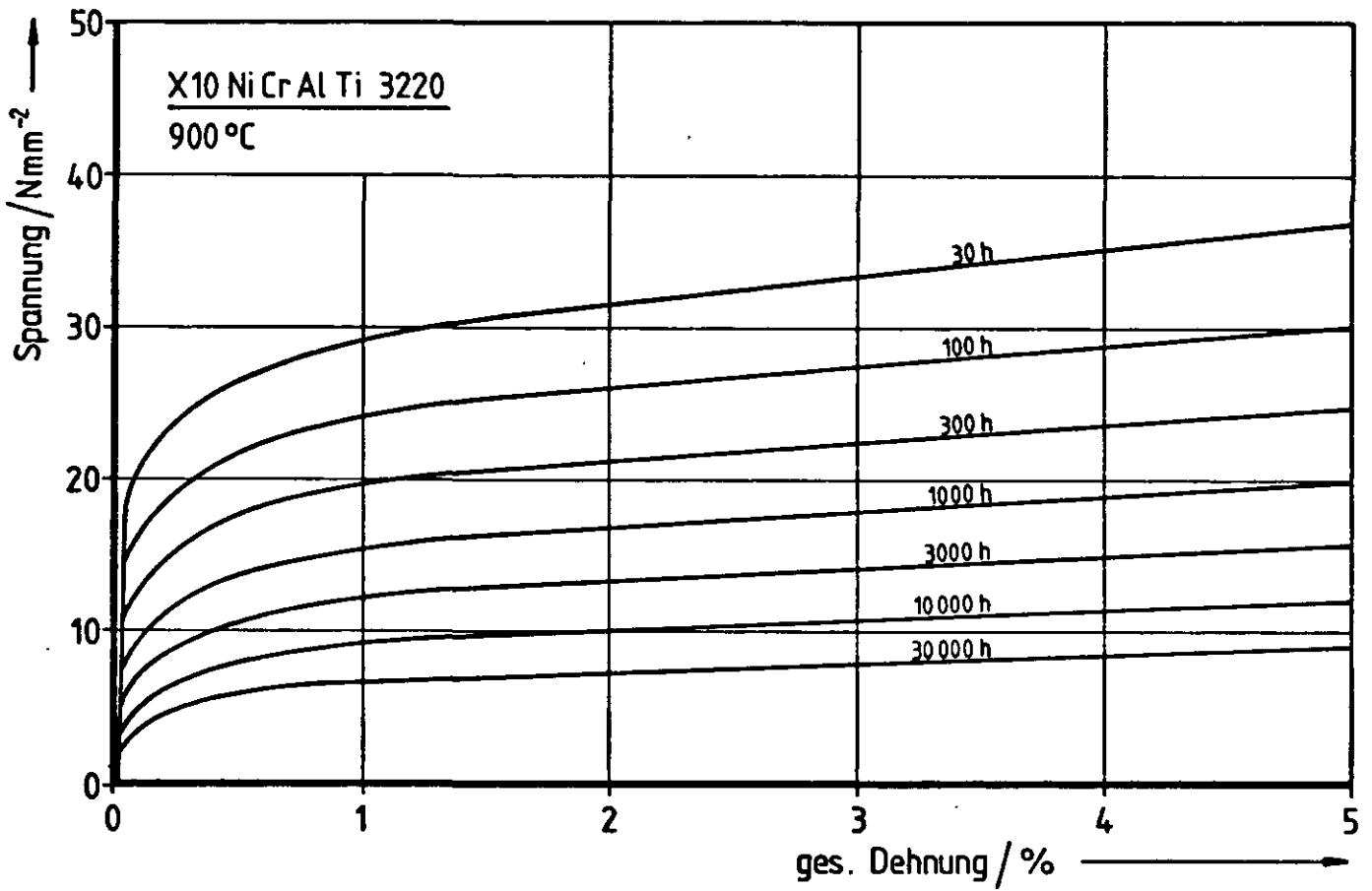
Stand: 1.1.1984

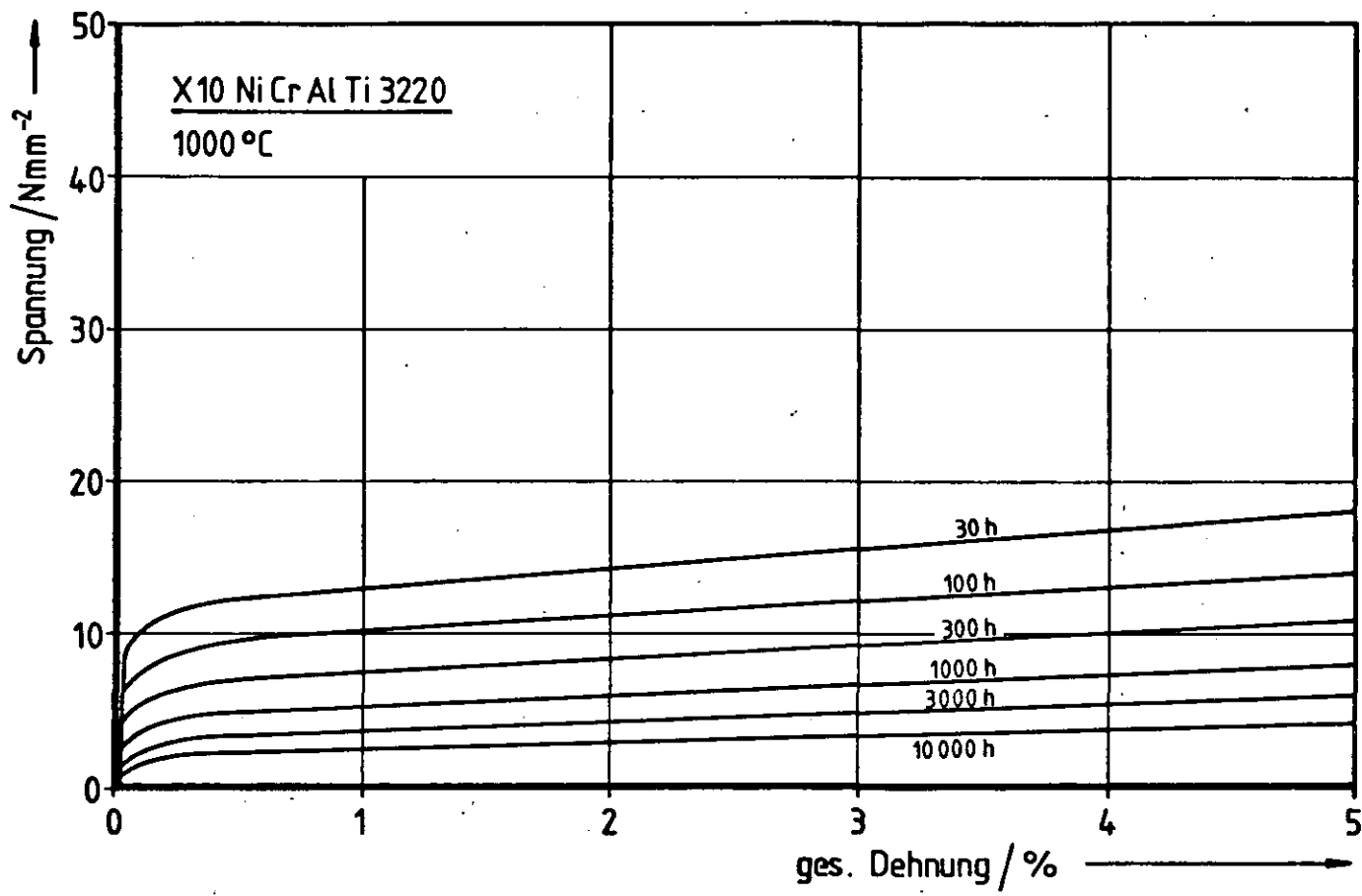
Seite 8

1.4876

## ZEITSTANDISOCHRONEN

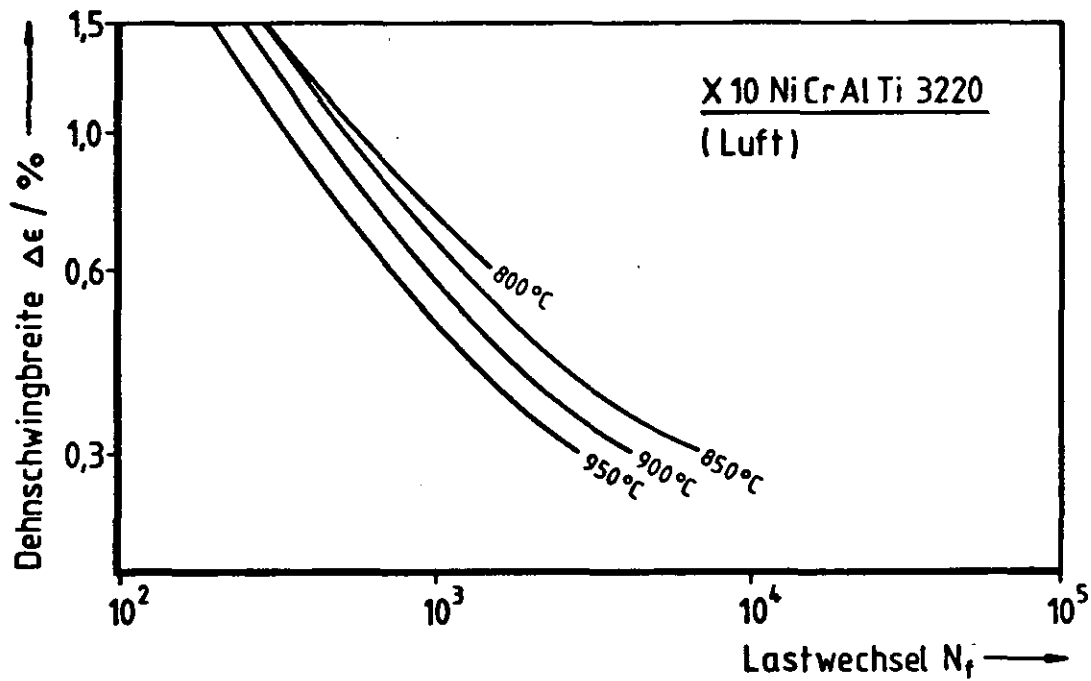




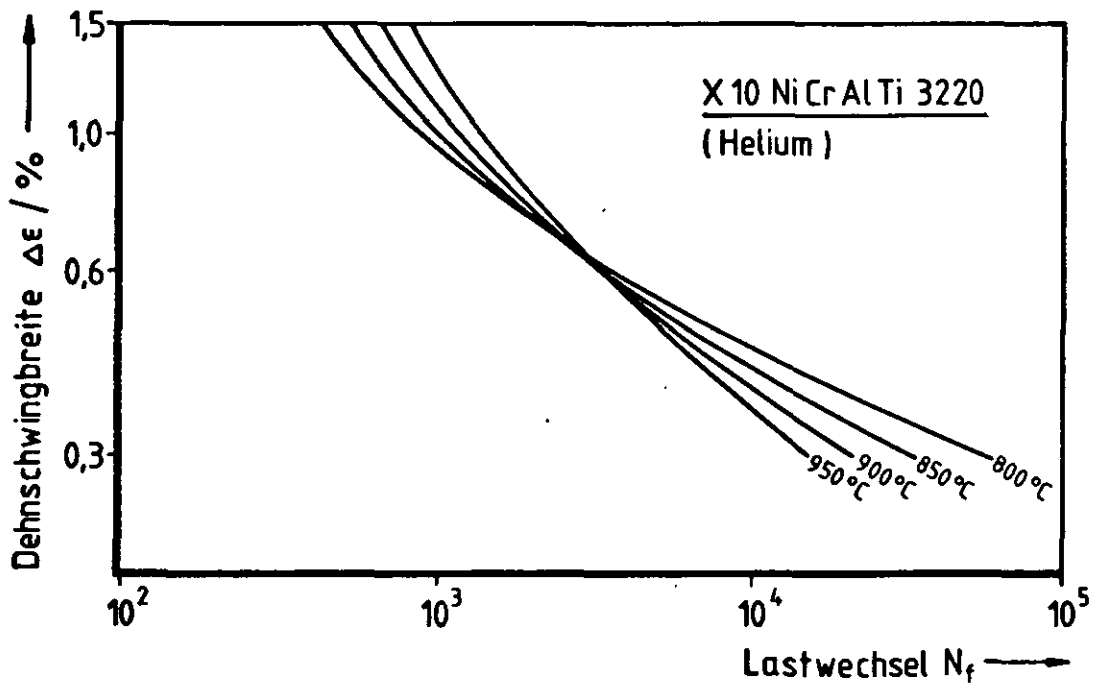


ERMÜDUNGSVERHALTEN

ERGEBNISSE AUS LCF-VERSUCHEN AN LUFT, DEHNUNGSGESTEUERT,  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



ERGEBNISSE AUS LCF-VERSUCHEN IN PNP-HELIUM, DEHNUNGSGESTEUERT,  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Mittelwerte, errechnet aus Ergebnissen von LCF-Versuchen im Rahmen des EG-HTR-Werkstoffprogramms.

KORROSIONSEIGENSCHAFTEN**PNP-HELIUM:**

800 - 900 °C: Bildung einer oxidischen Deckschicht ( $(\text{Cr},\text{Ti})_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Cr},\text{Mn})_3\text{O}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ), leichte Aufkohlung. Bei  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalten der Atmosphäre  $\leq 0,5$  ubar tritt oberhalb 850 °C die Bildung heterogener Deckschichten ( $(\text{Cr},\text{Ti})_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Cr},\text{Mn})_3\text{O}_4$ ,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ) auf, verbunden mit stärkerer Aufkohlung.

$\geq 950$  °C: Bei Feuchtegehalten der Atmosphäre  $\geq 1$  ubar ist mit Entkohlung zu rechnen. Bei niedrigeren Feuchtegehalten ( $\leq 0,5$  ubar) bilden sich heterogene Deckschichten (Cr/Mn- und Mn/Ti-Oxide,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ) mit gleichzeitig deutlicher Aufkohlung.

Bei allen Temperaturen ergeben sich interkristalline Korrosion und Bildung ausscheidungsfreier Zonen unter der Oberfläche.

**PROZESSGAS:**

Bildung einer oxidischen Deckschicht ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Cr},\text{Mn})_3\text{O}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ).

Metallverlust durch Deckschichtbildung etwa  $14 \mu\text{m}$  nach 10.000 h bei 950 °C.

Tiefe der inneren Oxydation (vorwiegend interkristallin) etwa  $50 - 100 \mu\text{m}$ .

<b>Datenblatt</b> <b>Stand: 1.1.1984</b>	<b>NIMONIC alloy 86</b>
---	-------------------------

## ALLGEMEINES

NIMONIC alloy 86 ist eine Nickel-Chrom-Molybdän-Legierung mit hoher Warmfestigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit.

NIMONIC alloy 86 findet Anwendung im Turbinenbau, bei Brennkammern und Nachbrennerkomponenten sowie Wärmebehandlungsanlagen der Werkstoffherstellung und -verarbeitung.

NIMONIC alloy 86 ist erhältlich in Form von Schmiederohlingen, Stangen, Platten, Blechen und Rohren.

Erzeugnisformen aus NIMONIC alloy 86 werden im lösungsgeglühten Zustand geliefert.

Auslegungsdaten für NIMONIC alloy 86 liegen derzeit in keinem anerkannten Regelwerk für Überwachungsbedürftige Anlagen vor.

## BEZEICHNUNGEN

NORM , HERSTELLER	BEZEICHNUNGEN
DIN-Bezeichnung	keine
Werkstoffnummer (VdEH)	keine
Henry Wiggin, U.K.	NIMONIC alloy 86
Int. Nickel Corp. (INCO)	IN 586

## CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG

Gew- %				Gew- %			
	min.	-	max.		min.	-	max.
<b>C</b>	0,04	-	0,06	<b>Si</b>		<	0,05
<b>Fe</b>		<	1,0	<b>Al</b>		<	0,25
<b>Cr</b>	24	-	26	<b>Ti</b>		<	0,05
<b>Ni</b>	Bal	-	67	<b>S</b>			
<b>Mo</b>	9	-	11	<b>P</b>			
<b>Mg</b>		<	0,04	<b>N</b>			
<b>Ce</b>	0,015	-	0,045	<b>B</b>			

(Angaben nach IA-Bericht 55.3389.4"A")

Stand: 1.1.1984Seite 2

NIMONIC alloy 86

VORSCHRIFTEN FÜR HERSTELLUNG, WÄRMEBEHANDLUNG UND KORNGRÖSSE**A) HERSTELLUNG:**

Erschmelzung:

Legierung kann in Luft erschmolzen werden, hohe Zeitstandfestigkeit ergibt sich jedoch bei Vakuumerschmelzung.

Schmiedestücke:

gleichmäßig schmiedbar und kalt verformbar.

Schweißungen:

gute Schweißbarkeit.

**B) WÄRMEBEHANDLUNG:**Lösungsglühen bei  $1150\text{ °C} \pm 15\text{ °C}$ 

Bleche 5-15 min

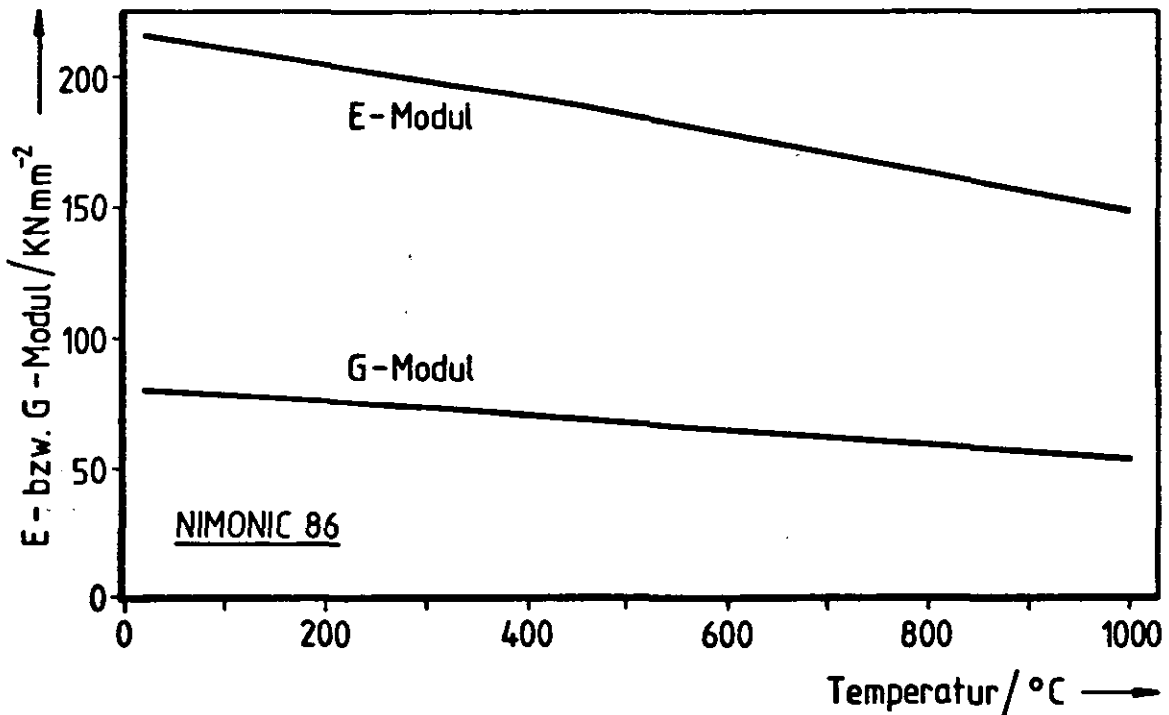
Stangen 2-4 h

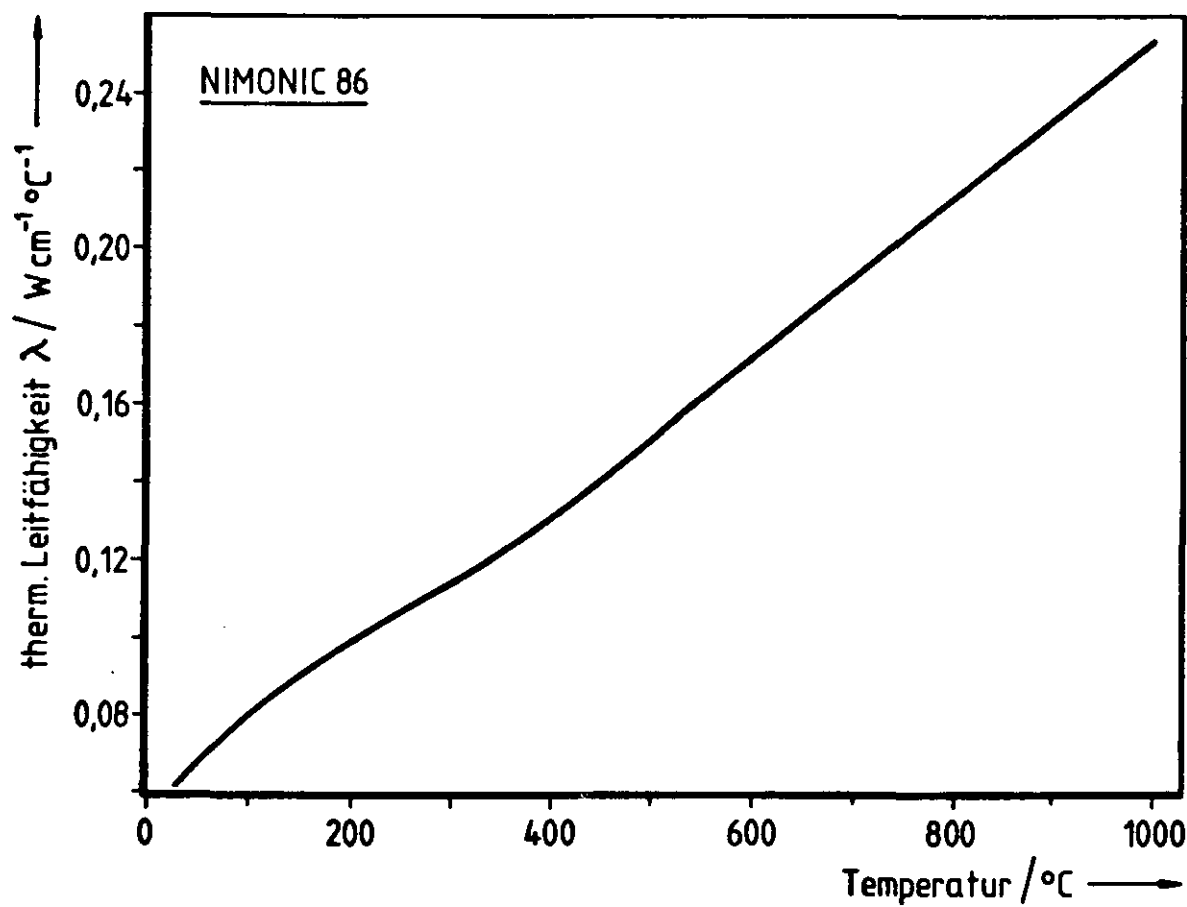
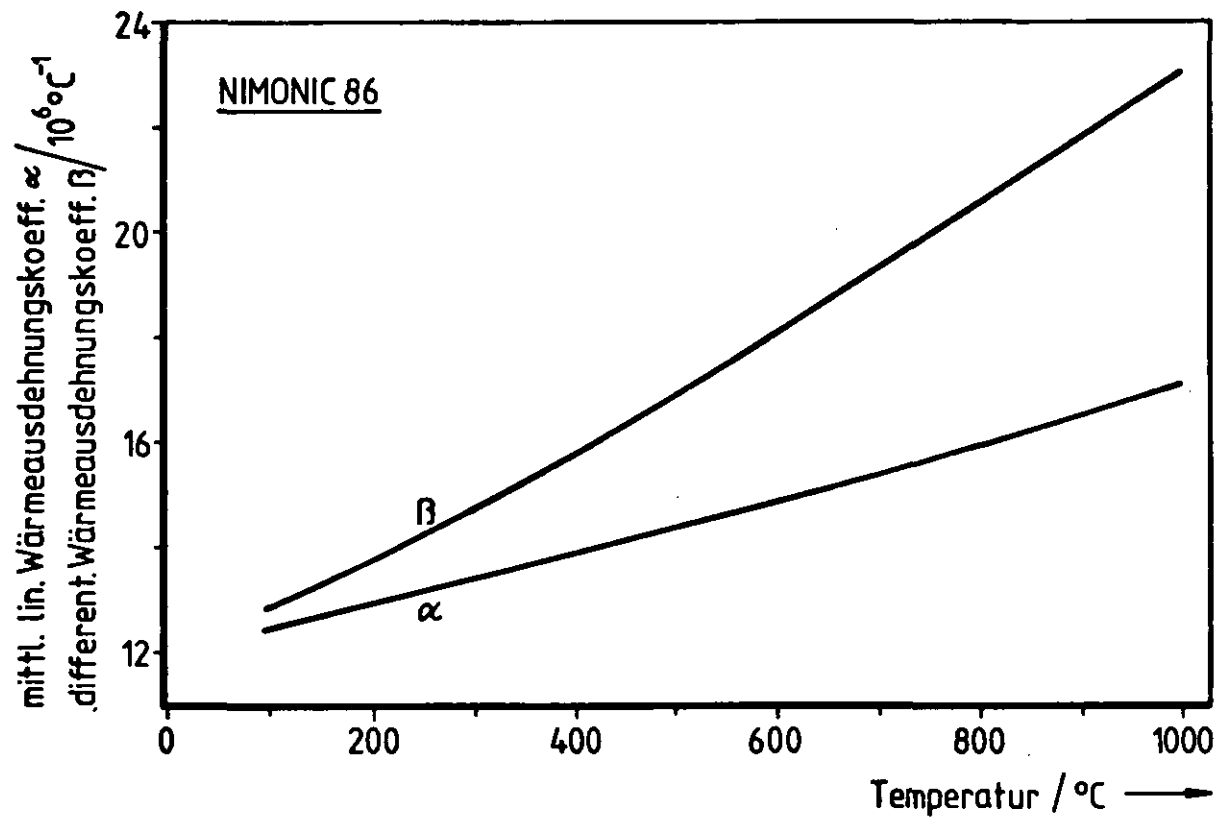
**C) VORHANDENE SPEZIFIKATIONEN:**

Für die Anwendung in NPW-Anlagen liegt der Entwurf eine PNP-Spezifikation vor (IA-Notiz 55.4099.0"B")

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTENDichte:  $8,54\text{ gcm}^{-3}$ 

Schmelztemperatur:







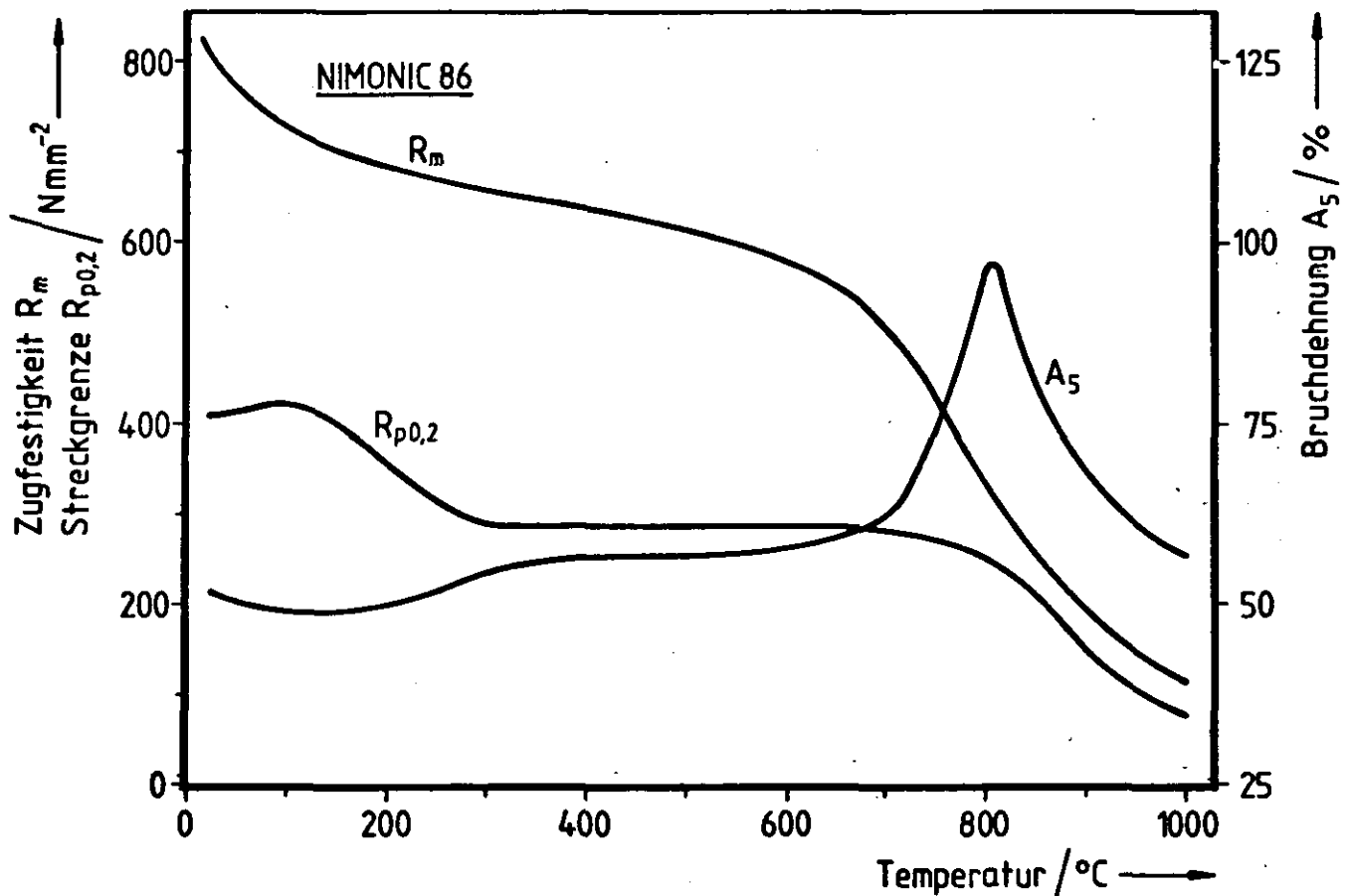
Stand: 1.1.1984

Seite 4

NIMONIC alloy 86

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

ERGEBNISSE AUS ZUGVERSUCHEN IM ANLIEFERUNGSZUSTAND



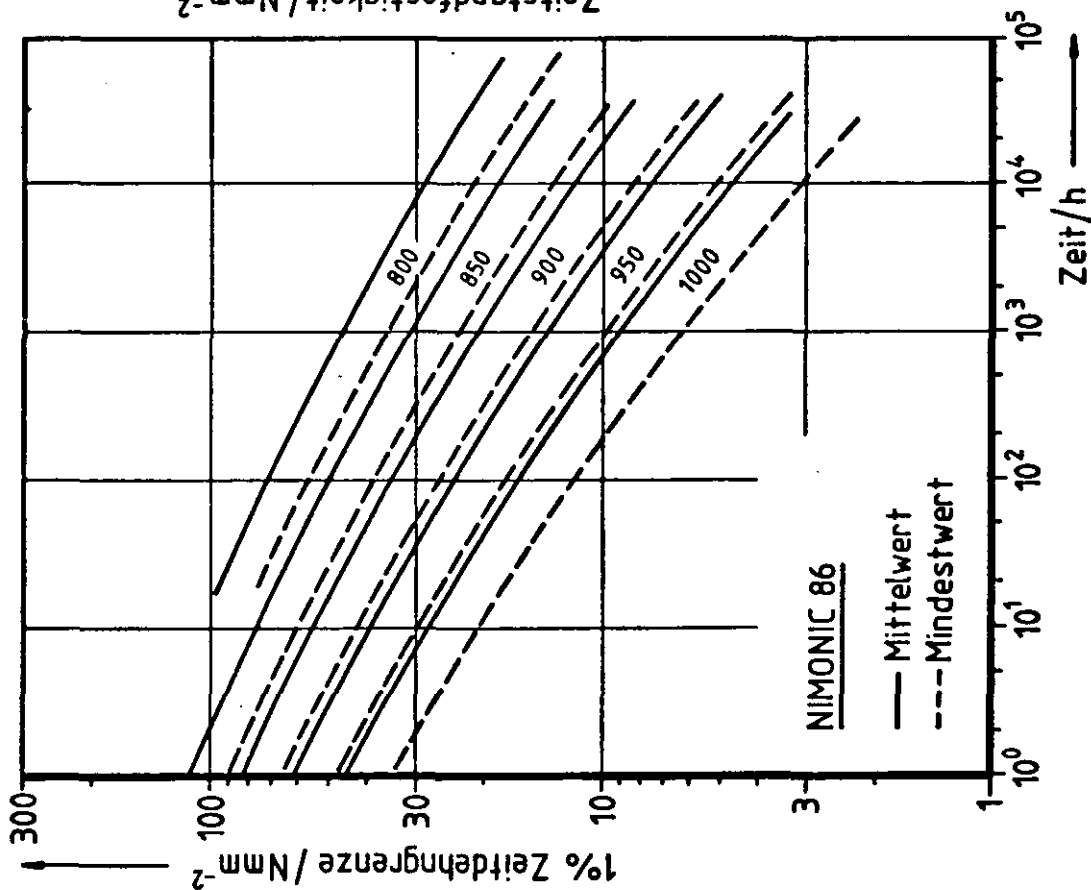
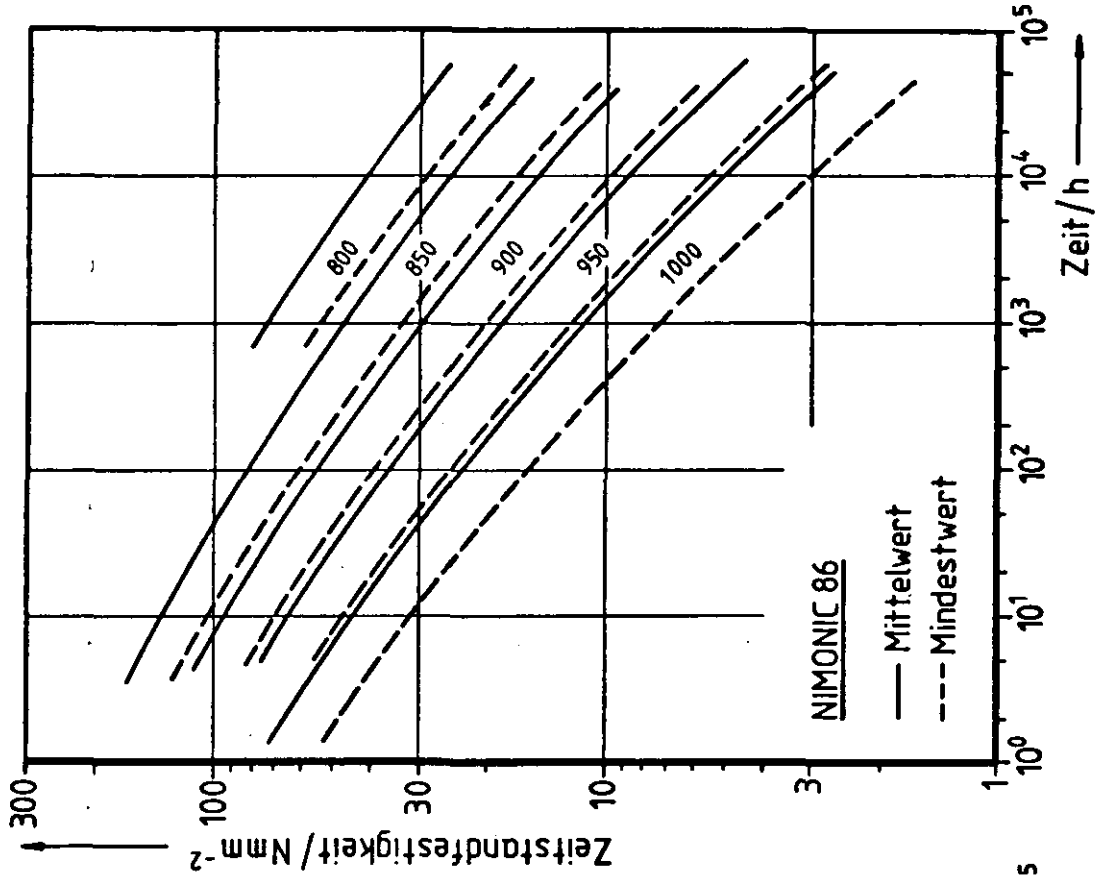
Angaben nach TM-HHT-62

extrapolierte Werte unter Hinzuziehung von Herstellerangaben

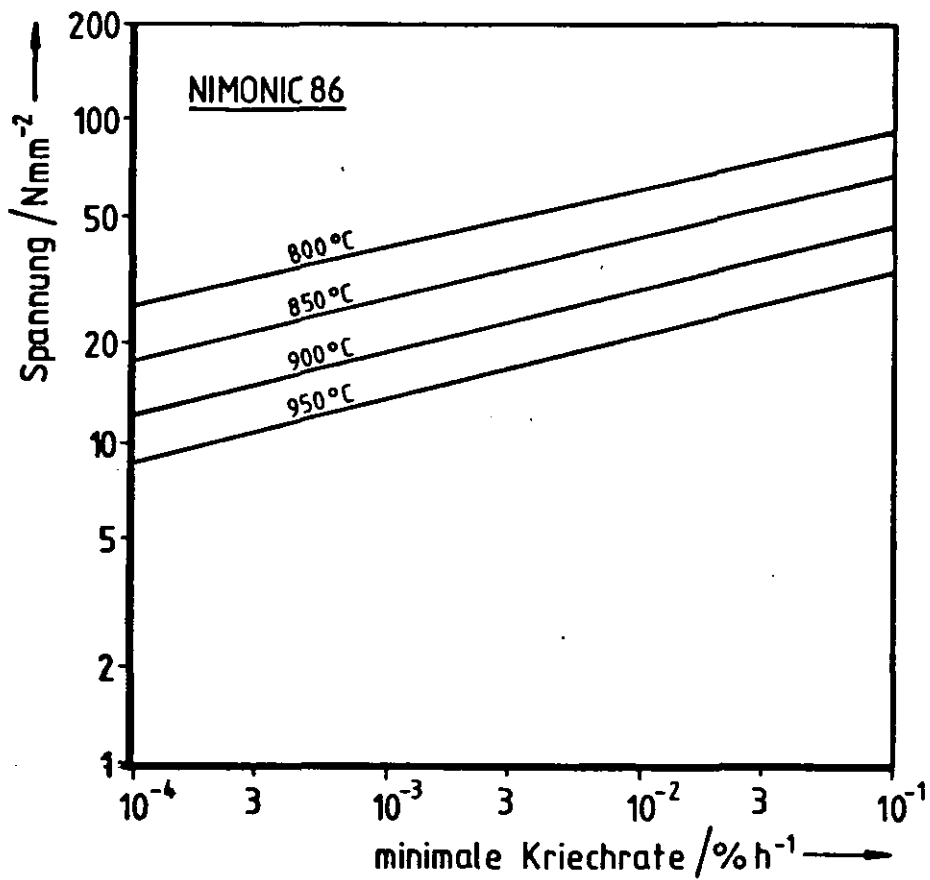
Mit zunehmender Temperatur werden Ergebnisse aus Warmzugversuchen abhängig von der Abzugsgeschwindigkeit, mit der der Zugversuch gefahren wird. Die Angaben über die 0,2%-Dehngrenze und Zugfestigkeit können daher nur einen ungefähren Anhaltspunkt darstellen.

ZEITSTANDVERHALTEN

## ZEITSTANDFESTIGKEIT UND 1% - ZEITDEHNGRENZE



## KRIECHDATEN



Interpolierte Werte, ermittelt aus Ergebnissen des EG-HTR-Werkstoffprogramms und aus Herstellerangaben über Kriechversuche an Luft. Je nach Versuchsschmelze können die k- und n-Werte um bis zu 50% von den angegebenen Mittelwerten abweichen.

$$\text{minimale Kriechrate} = k \cdot \sigma^n$$

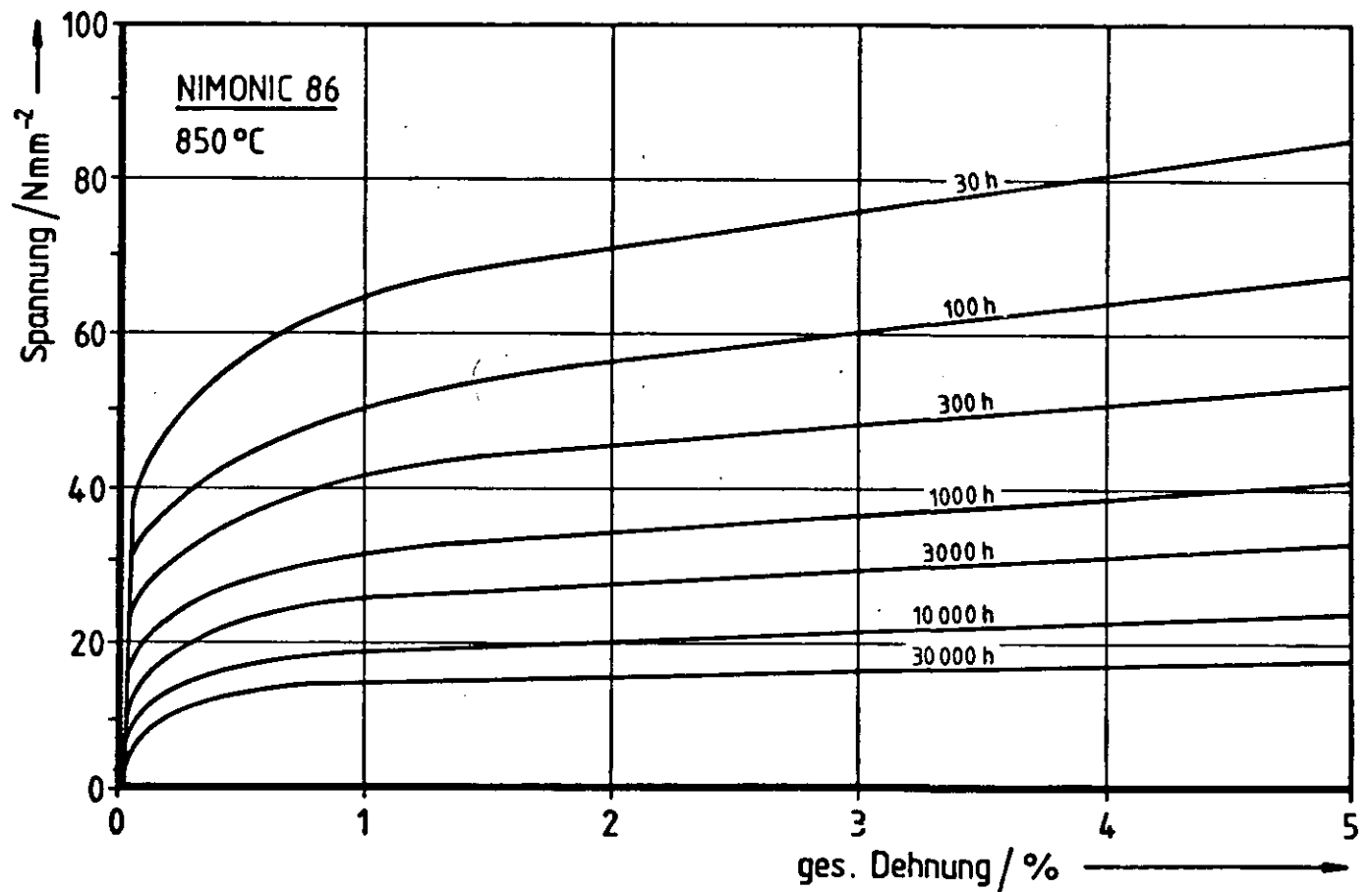
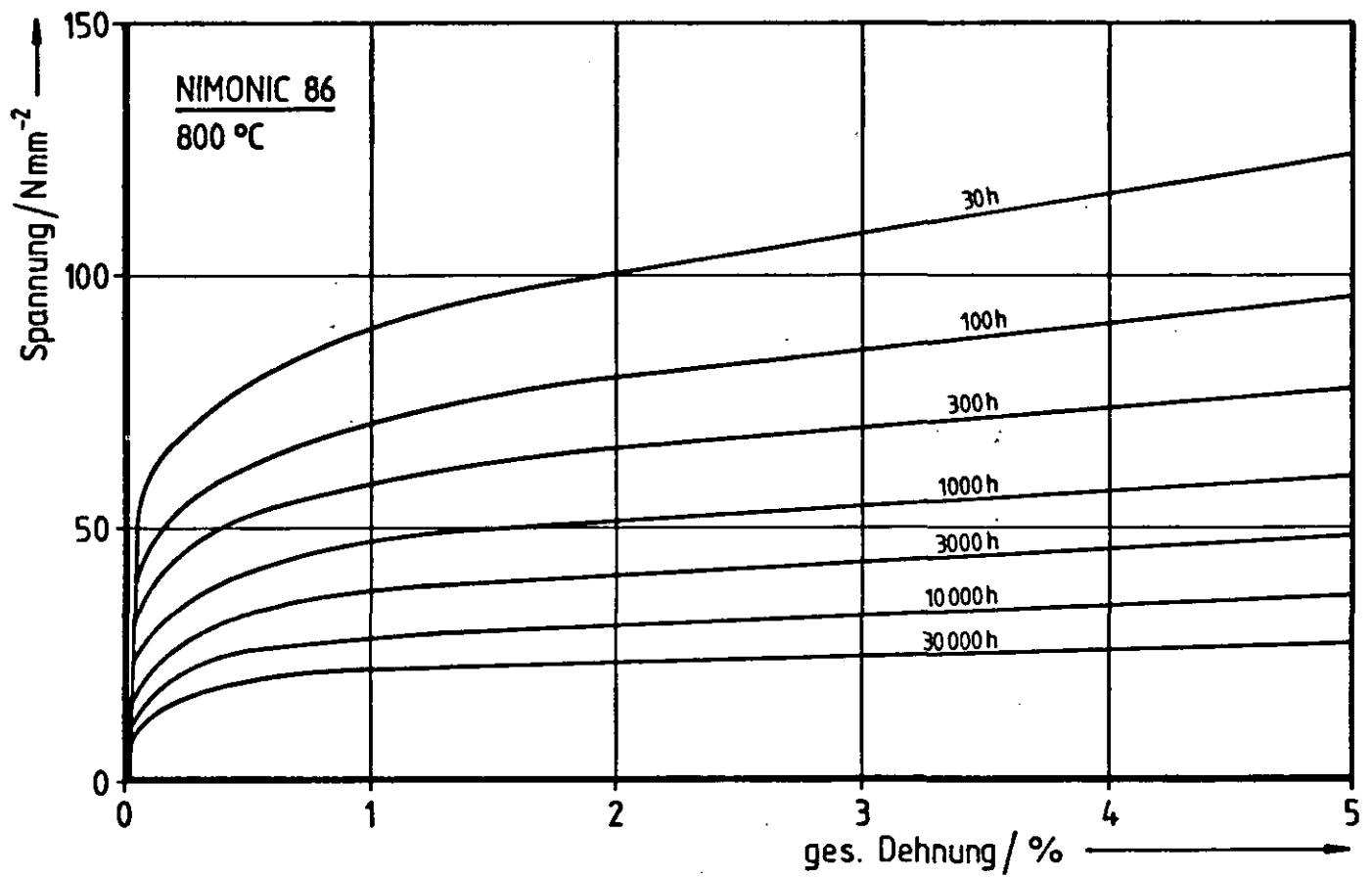
T (°C)	k (%h <sup>-1</sup> )	n
750	1,46 · 10 <sup>-15</sup>	6,54
800	1,37 · 10 <sup>-12</sup>	5,50
850	2,22 · 10 <sup>-11</sup>	5,26
900	2,51 · 10 <sup>-10</sup>	5,13
950	2,17 · 10 <sup>-9</sup>	4,97

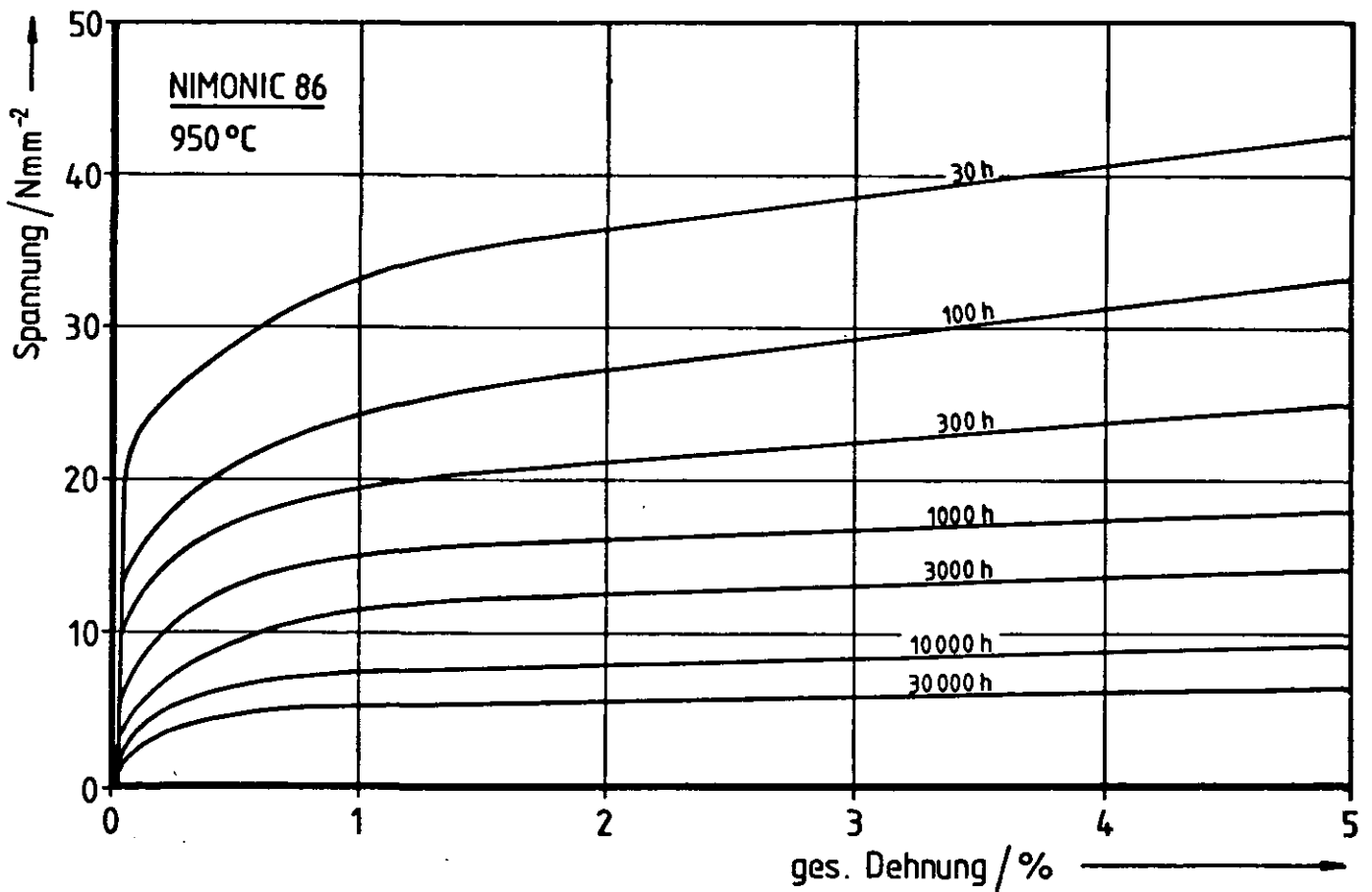
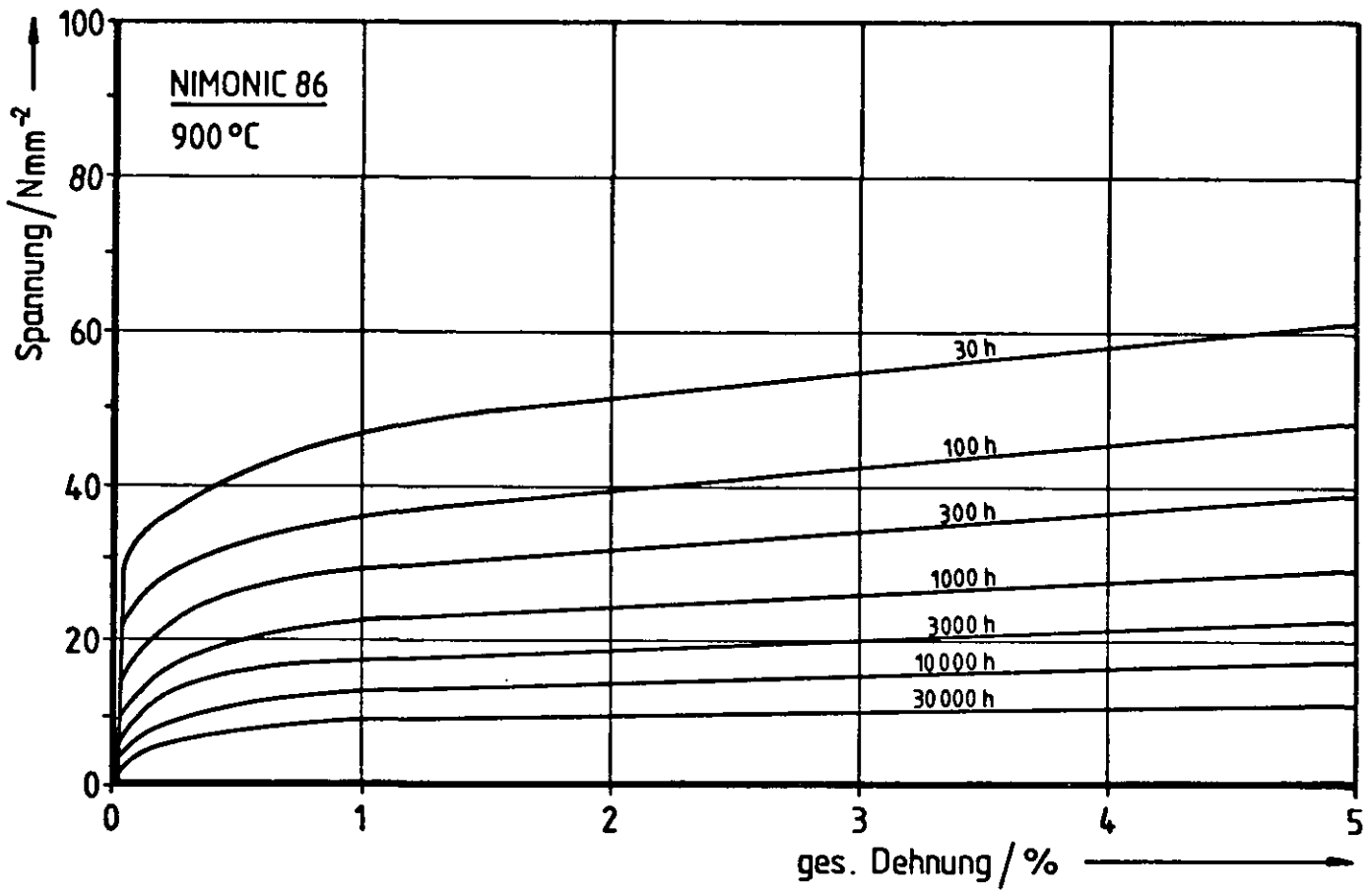
Stand: 1.1.1984

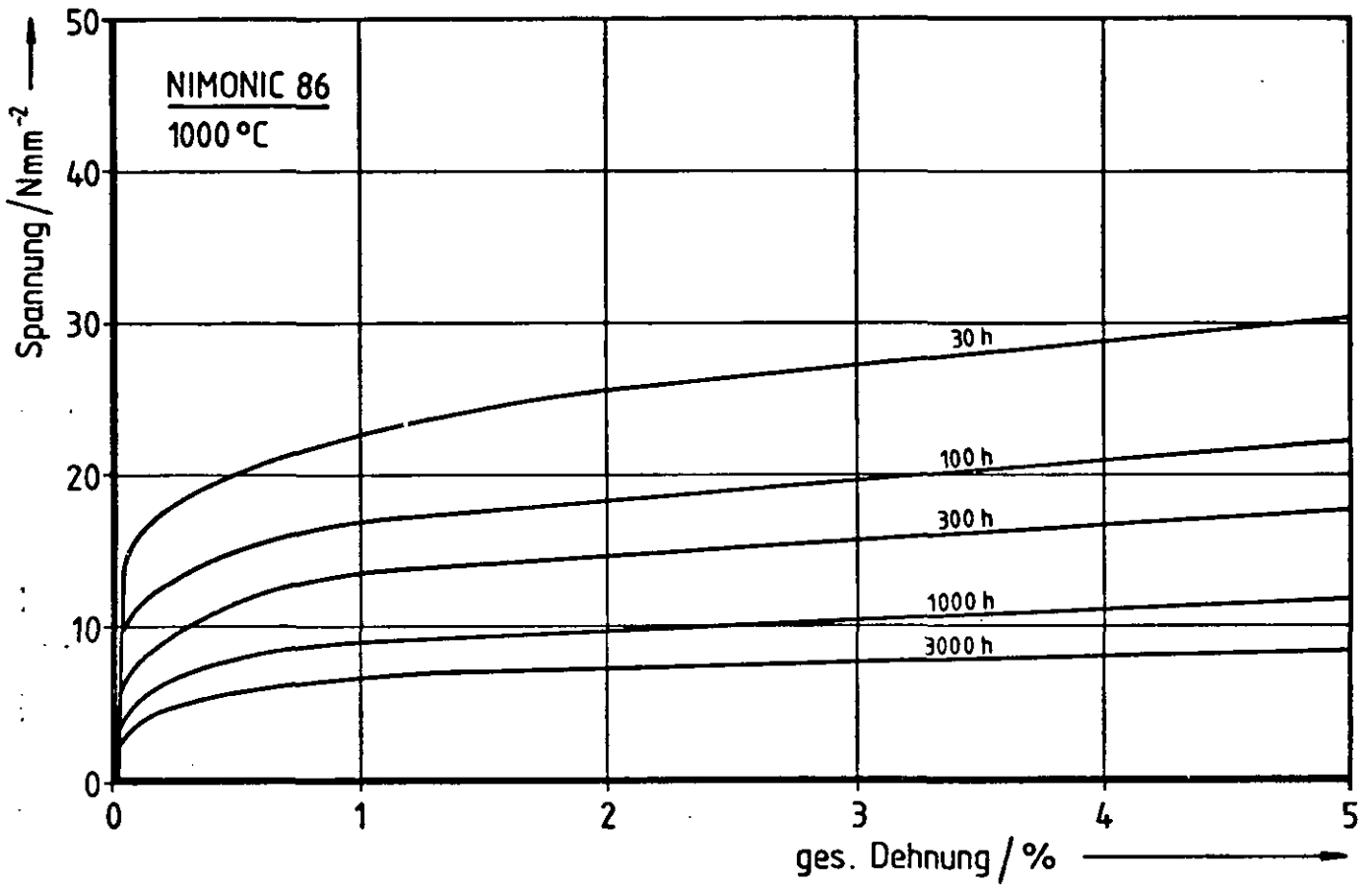
Seite 7

NIMONIC alloy 86

## ZEITSTANDISOCHRONEN

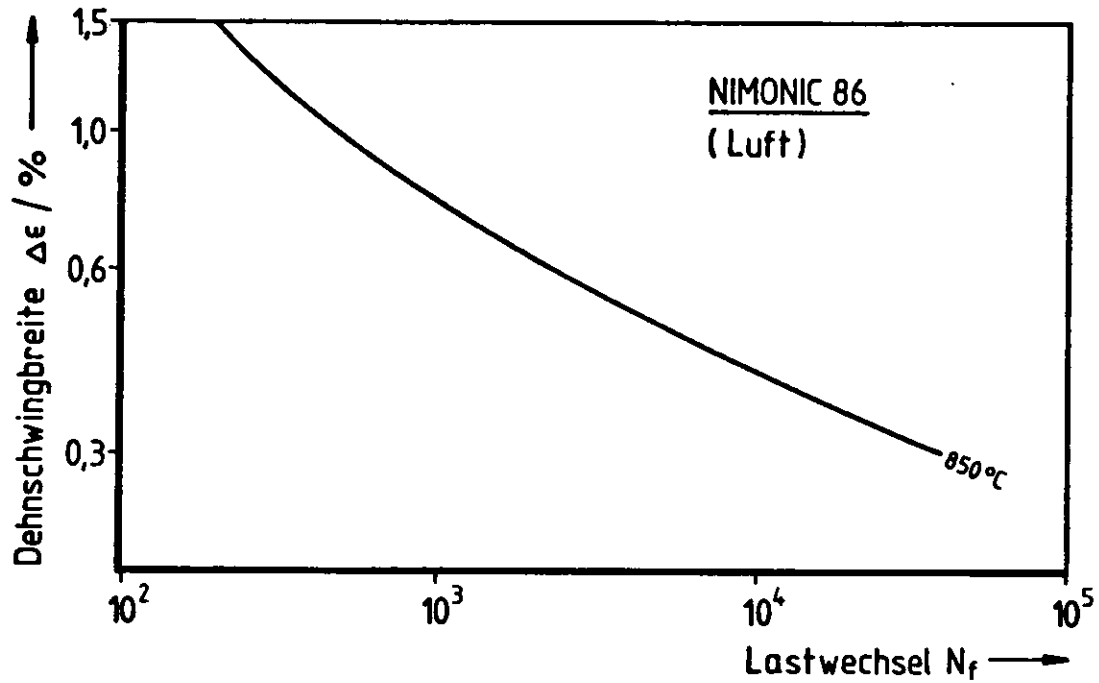






Stand: 1.1.1984Seite 10

NIMONIC alloy 86

ERMÜDUNGSVERHALTENERGEBNISSE AUS LCF-VERSUCHEN AN LUFT, DEHNUNGSGESTEUERT,  $\dot{\epsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 

Mittelwerte, errechnet aus Ergebnissen von LCF-Versuchen im Rahmen des EG-HTR-Werkstoffprogramms.

Stand: 1.1.1984Seite 11

NIMONIC alloy 86

KORROSIONSEIGENSCHAFTEN**PNP-HELIUM:**

Im gesamten Temperaturbereich Bildung einer reinen  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -Deckschicht bei sehr geringer Aufkohlung ohne innerer Oxydation und ohne ausscheidungsfreier Zone.

Bei  $\text{H}_2\text{O}$ -Gehalten der Atmosphäre  $\leq 0,5$  ubar tritt die Bildung heterogener Deckschichten ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{M}_6\text{C}$ ) auf, verbunden mit stärkerer Aufkohlung.

$\geq 950$  °C: Bei hohen Feuchte- und niedrigen CO-Gehalten ( $\leq 10$  ubar) kann leichte Entkohlung eintreten.

**PROZESSGAS:**

Ausbildung einer  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -Deckschicht.

Metallverlust durch Deckschichtbildung etwa  $6 \mu\text{m}$  nach 10.000 h bei  $950$  °C.

Keine innere Oxydation.



ANHANG B:                      Liste der Dokumentationen

lfd. Nr.	Titel	Verfasser
1.1	Erläuterung der Konstruktion von Komponenten einer PNP-Anlage	GHT/IA; Fischer
2.1	Darstellung der Erfahrungen von RWTÜV und HRB bei der Abwicklung des THTR	RWTÜV; Thissen
2.2	Anwendung des ASME-Code Case N 47 auf HTR-Komponenten, erforderliche Ergänzungen bzw. Überprüfungen. - erweiterte Fassung -	GRS; Bieniussa
2.3	Vergleich der Aussagen über Werkstoffe, Werkstoffverhalten und Werkstoffversagen verschiedener deutscher und amerikanischer Regelwerke hinsichtlich deren Anwendungsmöglichkeiten für den Werkstoffeinsatz bei Temperaturen oberhalb 800 °C	KFA; Over
2.4	Regelwerke für die Festigkeitsauslegung	GRS; Bieniussa; KFA; Over
2.5	Aussagen vorhandener Regelwerke zu - Herstellung und Konstruktion - Prüfung bei der Herstellung	RWTÜV; Just
3.1	Sicherheitstechnisches Konzept der PNP-Anlage	RWTÜV; Hahn
4.1	Verformungskurven im Hochtemperaturbereich	KFA; Over, Penkalla
4.2	Stellungnahme zur Thematik "Stoffgesetze"	GHT/IA; Schneider

...

lfd. Nr.	Titel	Verfasser
4.3	Diskussion der für die Durchführung inelastischer Analysen angewandten und benötigten Stoffgesetze	IA; Seehafer
4.4	Erörterung der Anwendung verschiedener Kriechgesetze auf das Zeitstandverhalten am Beispiel von INCONEL 617	KFA; Penkalla
4.5	Grundlagen der Invariantentheorie zur Berechnung des Bauteilverhaltens unter Kriechbeanspruchung	KFA; Penkalla
4.6	Entwurf eines Werkstoffbegutachtungsplanes für austenitische Fe-Ni-Cr- und Sonderlegierungen auf Ni-Basis, die in Hochtemperaturreaktorsystemen für sicherheitstechnisch wichtige Anlageteile eingesetzt werden sollen	RWTÜV; Thissen
4.7	Stellungnahme zu den Unterlagen des RWTÜV	HRB; Bodmann
4.8	Vorschriften für die Herstellung von Werkstoffen und Erzeugnisformen für gasgekühlte Reaktoren mit Auslegungstemperaturen oberhalb 800 °C	RWTÜV; Just
5.1	Probleme der Schadensakkumulation bei Belastungskollektiven	MPA; Hoffmann
5.2	Anwendung verschiedener Lebensdauer-Extrapolationsverfahren aus LCF-Haltezeitergebnissen an INCOLOY 800 H bei 850 °C	GHT/IA, Meurer
5.3	Neuere Ansätze zur Schadensakkumulation	MPA; Hoffmann

...

lfd. Nr.	Titel	Verfasser
6.1	Auswahl kritischer Bauteile für die Durchführung von Störfallanalysen aus der Sicht der Festigkeit	IA, Seehafer
6.2	Berücksichtigung des Einflusses der Korrosion auf die mechanischen Eigenschaften von Hochtemperaturlegierungen bei der Auslegung von HTR-Komponenten	KFA; Schuster
7.1	Zeitdehngrenzen und Zeitsicherheiten gegen Bruch	HRB; Diehl
7.2	Sicherheitsfaktoren bei außendruckbelasteten zylindrischen Bauteilen im Hochtemperaturbereich	GHT/IA; Schulze
8.1	Bauteilverhalten ohne Fehler	RWTÜV; Becker
8.2	Erläuterung von Ratcheting am einfachen 3-Stab-Modell	GHT/IA; Angerbauer
8.3	Kriechratchetinganalysen	KFA; Over
8.4	Parameterstudie zu Creep-Ratcheting	HRB; Kemter, Sindel
8.5	Kriechratcheting eines Rohres infolge eines wechselnden Temperaturgradienten von $\pm 15$ K (Betriebseinfluß)	GRS; Bieniusa
8.6	Kriechratcheting eines Rohres infolge eines wechselnden Temperaturgradienten von $\pm 15$ K (Heißstrahleneinfluß)	GRS; Bieniusa

...

lfd. Nr.	Titel	Verfasser
8.7	Kriechbeulen von Hochtemperaturkomponenten (Theoretische Vorarbeit für die Prüfung bauteilrelevanter Proben)	KFA; Over
8.8	Ermüdungsuntersuchungen am Heißen Sammler des He/He-Wärmetauschers infolge thermischer Belastungen	GHT/IA; Schulze
8.9	Probleme der Anwendung der Bruchmechanik im Rahmen eines Regelwerkes für Anwendungs- temperaturen oberhalb 800 °C	KFA; Penkalla
8.10	Anforderungen und Möglichkeiten für wieder- kehrende Prüfungen von HTR-Primärkreis- komponenten	GRS; RWTÜV; GHT/IA Bieniussa, Hahn, Fischer, Seehafer, Werden
9.1	Vorschriften für die Herstellung von Komponenten und Systemen für gasgekühlte Reaktoren mit Auslegungstemperaturen oberhalb 800 °C	RWTÜV; Just
10.1	Versuche an bauteilrelevanten Proben im IRW als Grundlage für ein HTR-Regelwerk	KFA; Rüdiger, Over, Penkalla, Schubert, Nickel
10.2	Werkstoffverhalten unter komplexer Beanspruchung	HRB; GHT/IA; BBC; KFA; Bodmann, Breuer, Raule, Rüdiger
10.3	Zeitstand- und Behälterversuche an rohrför- migen Bauteilen mit für den Hochtemperatur- reaktor relevanten Abmessungen im Tempera- turbereich 850 bis 1020 °C	MPA;

lfd. Nr.	Titel	Verfasser
A.1	Datenblätter für die Werkstoffe Ni Cr 22 Co 12 Mo Ni Cr 22 Fe 18 Mo X 10 Ni Cr Al Ti 32 20 NIMONIC 86	KFA; Penkalla
11.1	Stellungnahme zur Auslegungsberechnung eines RSO-Rohres der Firma LURGI	KFA; Breitbach, Over
12.1	Rechnungen zur Spannungsrelexation für ein Rechenmodell im Hochtemperaturbereich	IA, Schäfer
13.1	FE-Rechnungen zur gleichzeitigen Beanspru- chung von Rohrwandungen durch Primär- und Thermospannungen im Kriechbereich	KFA; Breitbach
14.1	Relaxation analog Robinson	GRS; Bieniusa
15.1	Mathematische Bestimmung der Konstanten in der nach Robinson ermittelten Re- laxationsgleichung	GRS, Bieniusa